



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia de Energia**

**Viabilidade Técnica de Gás Natural na Região do
DF**

Autor: Luiz Eduardo Nunes de Albuquerque

**Orientadora: Professora Doutora Maria del Pilar
Hidalgo Falla**

**Gama, DF
2013**



Luiz Eduardo Nunes de Albuquerque

VIABILIDADE TÉCNICA DO GÁS NATURAL NA REGIÃO DO DF

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientadora: Professora Doutora
Maria del Pilar Hidalgo Falla.

**Gama, DF
2013**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Albuquerque, Luiz.

Viabilidade Técnica de Gás Natural na Região do DF/ Luiz
Eduardo Nunes de Albuquerque. Brasília: UnB, 2013. 103 p.
61: il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2013. Orientação: Professora
Doutora Maria del Pilar Hidalgo Falla.

1. Gás Natural. 2. Dual Fuel. 3. Comercialização no DF
I. Falla, Maria.

II. Viabilidade Técnica de Gás Natural na Região do DF.

CDU Classificação



REGULAMENTO E NORMA PARA REDAÇÃO DE RELATÓRIOS DE PROJETOS DE GRADUAÇÃO FACULDADE DO GAMA - FGA

Luiz Albuquerque

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 18/07/13 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof^a. Doutora: Maria del Pilar, UnB/ FGA
Orientadora

Prof. Doutor: Marcelo Bento, UnB/ FGA
Membro Convidado

Engenheiro Heden Cruz, CEBGAS
Membro Convidado

Gama, DF
2013

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me abençoar durante todos esses anos e me conceder a oportunidade de estudar.

Agradeço à minha família pelos anos em que me encorajaram e me apoiaram nos estudos. Aos meus pais, Ellison Pires e Deusedite Souza, aos meus irmãos, Ajax Albuquerque, Guilherme Pires, Rodrigo Pires e Vanessa Pardellas, às minhas primas, Raiana Corecha e Sara Corecha.

Às amigas vinculadas durante a graduação de Engenharia de Energia, Bruna Thyemme, Bruno Suehara, Jéssica Santoro, João Silveira, Natália Aoyama, Ricardo da Silva, Túlio Perreira, Vitor Magalini, William Macedo.

Aos que sempre estiveram por perto dispostos a ajudar, Anna Bonifácio, Eduardo Soares, Igor Albuquerque, Jefferson Landin, Kleiton Teles, Matheus Xavier, Rodrigo Aguiar, Thomas Santos, Williman Gonçalves.

Ao auxílio nos testes de motor de Danilo Honorato e Lauro Oliveira graduandos da Engenharia Mecânica – Faculdade de Tecnologia/Universidade de Brasília/Campus Darcy Ribeiro.

Em especial, à orientadora desse trabalho, Professora Doutora Maria del Pilar Hidalgo Falla, por partilhar seu tempo e seus conhecimentos.

Luiz Eduardo Nunes de Albuquerque

RESUMO

O Gás Natural é um combustível fóssil, assim como outros derivados do petróleo, apesar de ter uma combustão mais limpa e emitir uma menor quantidade de gases poluentes. Possui uma ampla gama de aplicações ainda não exploradas. Nesse contexto, esse trabalho realizou estudos de teste de motor utilizando gás natural para avaliar a redução de consumo de diesel e da emissão de gases gerados. A caracterização físico-química do gás natural e a identificação dos componentes dos gases de exaustão foram realizados pelo analisador de gases, PC-Multigas, e pela técnica de Espectroscopia FTIR (infravermelho com transformada de Fourier). Verificou-se que os gases de exaustão tiveram uma redução na quantidade de dióxido de carbono e de particulados, no entanto, tiveram aumento de hidrocarbonetos e de monóxido de carbono. A redução do consumo de diesel no motor de aproximadamente 45% com o uso do gás natural, garante o consumo deste, principalmente, no mercado veicular e também no mercado domiciliar e industrial na região do DF.

Palavras-chave: Gás Natural, Dual Fuel, Comercialização no DF.

ABSTRACT

The Natural Gas is a fossil combustible, like derivatives of petroleum, despite of has a clean combustion and produces less pollutants gas. Has a huge variety of applications yet unexplored. At this context, this project made studies of motor testes using natural gas for evaluate reduction of diesel consumption and emission of gas. The physical-chemistry characterization of the gas and identification of composition of exhaustion gas were made by Gas Analyzer, PC-Multigas, and by technique of Spectroscopy FTIR (infrared with transformation of Fourier). Exhaustion gases had a reduction on amount of dioxide of carbon and of particulates, however, they had an increase of hydrocarbons and of monoxide of carbon. The reduction of diesel consumption on engine of about 45% with use of natural gas, ensures the consumption of this, mainly, on automotive market, but either on domiciliary and industrial market at DF.

Key-words: Natural Gas, Dual Fuel, Commercialization at DF.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1– Fluxograma de aplicações do gás natural. | 1 |
| Figura 2– Reservas mundiais. Fonte: Gomes, 2007. | 6 |
| Figura 3– Pré Sal. Fonte: Silva, 2011. | 9 |
| Figura 4 – Macrofluxo do Transporte de GN por gasodutos. Fonte: Contatos Pessoais 1. | 11 |
| Figura 5– Comparação do volume do gás na forma líquida e na gasosa. Fonte: Petrobras, 2013. | 12 |
| Figura 6 – Sistema de produção até regaseificação do GNL. Fonte: SulGás, 2012. | 12 |
| Figura 7 – Ciclo da Liquefação do GN. Fonte: Rouzaut, 2011. | 13 |
| Figura 8 - Transformação termoquímica da matéria orgânica. Fonte: Thomas, 2001.. | 15 |
| Figura 9 – Reservatório de gás associado. Fonte: PetroGasNews, 2012..... | 16 |
| Figura 10 – Fluxograma do processamento primário de fluidos. Fonte: Thomas, 2001. | 17 |
| Figura 11 – Separador Bifásico. Fonte: Thomas, 2001. | 18 |
| Figura 12 – Separador Trifásico. Fonte: Thomas, 2001. | 19 |
| Figura 13– Aminas para remoção de gases ácidos. Fonte: Brasil, 2011..... | 21 |
| Figura 14– Remoção de H ₂ S com MEA. Fonte: Brasil, 2011. | 21 |
| Figura 15– Operação unitária do processo MEROX GLP. Fonte: Brasil, 2011..... | 22 |
| Figura 16 – Fluxograma de uma UPGN. Fonte: Contatos Pessoais 1..... | 24 |
| Figura 17 – Distribuição de custos de um projeto GNL. Fonte: Gomes, 2007 | 31 |
| Figura 18 - Diagrama de blocos com principais componentes de um espectrômetro FTIR. Fonte: Luz, 2003. | 35 |
| Figura 19 - Ciclo Termodinâmico do Motor Dual Fuel. Fonte: BET, 1991..... | 38 |
| Figura 20 - Diagrama Dual Fuel com dispositivo do CENPES. Fonte: Latres, 1991.... | 39 |
| Figura 21 - Bancada de Resistências. | 40 |
| Figura 22 - Cilindro com GNV. | 40 |
| Figura 23 - Gerador à Diesel..... | 41 |
| Figura 24 - Analisador de Gases..... | 42 |
| Figura 25 – Equipamento de espectroscopia FTIR marca Thermo Scientific- Modelo IS 10 com espectro em detalhe. | 42 |
| Figura 26 – Misturador Acoplado ao Motor. | 43 |
| Figura 27 - Redutor de Pressão..... | 43 |
| Figura 28 - Válvula de Abastecimento. | 44 |
| Figura 29 – Válvula de segurança..... | 44 |

| | |
|--|----|
| Figura 30 – Fluxograma de montagem da tecnologia DUAL FUEL montado no Laboratório LEA-FT-UnB. | 45 |
| Figura 31 – Celas de: A) ZnSe e B) KBr. | 46 |
| Figura 32 – Espectro do diesel puro, biodiesel e do diesel comercial. | 47 |
| Figura 33 – Espectro do Gás Natural Veicular. | 49 |
| Figura 34 – Emissões de CO. | 51 |
| Figura 35 – Emissão de CO ₂ | 51 |
| Figura 36 – Emissão de HC | 52 |
| Figura 37 – Consumo Diesel. | 52 |
| Figura 38 – Redução do consumo de diesel. | 53 |
| Figura 39 – Infravermelho dos gases de Exaustão. | 54 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Tratamento e especificação do gás..... | 23 |
| Tabela 2 – Comparação dos tipos de processo. Fonte: Contatos Pessoais 1..... | 25 |
| Tabela 3 – Composição típica do Gás Natural. | 26 |
| Tabela 4– Especificação do gás Natural. ANP nº16, 17.6.2008 – DOU 18.6.2008 | 27 |
| Tabela 5– Comparação dos combustíveis. Fonte: Contatos Pessoais 1..... | 28 |
| Tabela 6 – Dados do Gás Natural. Fonte: Contatos Pessoais 2. | 32 |
| Tabela 7 – Potencial do Gás Natural para os Setores a serem Atendidos. Fonte: Contatos Pessoais 2..... | 32 |
| Tabela 8 – Comparação do consumo de alguns combustíveis. Fonte: Contatos Pessoais 2..... | 33 |
| Tabela 9 - Taxa de compressão e rendimento Térmico de motores. Fonte: Orlando, 1998. | 37 |
| Tabela 10 – Emissões e consumo no motor a Diesel..... | 48 |
| Tabela 11 – Emissões e consumo no motor Dual Fuel. | 48 |
| Tabela 12 – Redução do consumo de diesel no motor Dual Fuel | 50 |

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

| | | |
|-----|---------------------------|----------------------|
| d | Densidade relativa | [adimensional] |
| IW | Índice de Wobbe | [kJ/m ³] |
| PCS | Poder Calorífico Superior | [kJ/m ³] |

Siglas

| | |
|-----------------|--|
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| ANP | Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis |
| ATR | Espectroscopia no infravermelho por Refletância Total Atenuada |
| B0 | Diesel puro |
| B100 | Biodiesel |
| B5 | Diesel Comercial |
| BEN | Balanço Energético Nacional |
| BP | British Petroleum |
| CENPES | Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Petrobras |
| CO | Monóxido de Carbono |
| CO ₂ | Dióxido de Carbono |
| DF | Distrito Federal |
| DOE | Departamento de Energia |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| FGA | Faculdade Gama |
| FT | Faculdade de Tecnologia |
| FTIR | Infra vermelho com transformada de Fourier |
| GLP | Gás Liquefeito do Petróleo |
| GN | Gás Natural |
| GNC | Gás Natural Comprimido |
| GNL | Gás Natural Liquefeito |
| GNV | Gás Natural Veicular |
| LGN | Líquido Gás Natural |
| MEA | Monoetanolamina |
| NO _x | Óxidos de Nitrogênio |
| PROCONVE | Programa de Controle de Emissões Veiculares |
| UPGN | Unidades de Processamento de Gás Natural |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 MOTIVAÇÃO – ENERGIA E GÁS NATURAL..... | 1 |
| 1.2 OBJETIVOS..... | 3 |
| 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO..... | 3 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 2.1 PANORAMA DO GÁS NATURAL | 4 |
| 2.1.1 Histórico..... | 4 |
| 2.1.2 Panorama Mundial | 5 |
| 2.1.3 Indústria Brasileira | 7 |
| 2.1.4 Incremento com a descoberta do Pré-Sal | 8 |
| 2.1.5 Sistema Tecnológico..... | 9 |
| 2.2 PROCESSAMENTO DO GÁS NATURAL | 14 |
| 2.2.1 Jazidas do Gás | 14 |
| 2.2.2 Sistema separação Líquido Vapor (Vasos separadores)..... | 16 |
| 2.2.3 Tratamento do gás | 20 |
| 2.2.4 Unidade de Processamento Gás Natural (UPGN)..... | 23 |
| 2.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO QUÍMICA DO GÁS NATURAL | 25 |
| 2.4 MODAIS DE TRANSPORTE | 28 |
| 2.4.1 Modal Dutoviário | 28 |
| 2.4.2 Modal Rodoviário | 30 |
| 2.4.3 Modal Hidroviário | 30 |
| 2.5 MERCADO DO DISTRITO FEDERAL..... | 31 |
| 3. GÁS LOCAL | 33 |
| 4. METODOLOGIA | 34 |
| 4.1 INTRODUÇÃO EXPERIMENTAL..... | 34 |
| 4.1.1 Espectroscopia FTIR..... | 34 |
| 4.1.2 Espectroscopia ATR | 36 |
| 4.1.3 Teste de motor (Sistema Dual-Fuel)..... | 36 |
| 4.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS..... | 39 |
| 4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL..... | 44 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 46 |
| 6. CONCLUSÕES | 55 |
| 6.1 CONCLUSÕES FINAIS..... | 55 |
| 6.2 PRÓXIMOS TRABALHOS | 55 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS | 56 |
| ANEXOS..... | 58 |

1. INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO – ENERGIA E GÁS NATURAL

O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos leves, principalmente metano (CH_4). É um dos combustíveis mais limpos, devido a sua queima emitir baixas quantidades de dióxido de enxofre (SO_2) e de material particulado. Ao contrário do petróleo, o gás natural se encontra em estado gasoso na pressão e temperatura ambientes. É encontrado em jazidas, associado ou não ao petróleo, que podem se encontrar em terra (*onshore*) ou em mar (*offshore*).

A figura 1 mostra as aplicações do gás natural nos mercados domiciliar, industrial e veicular.

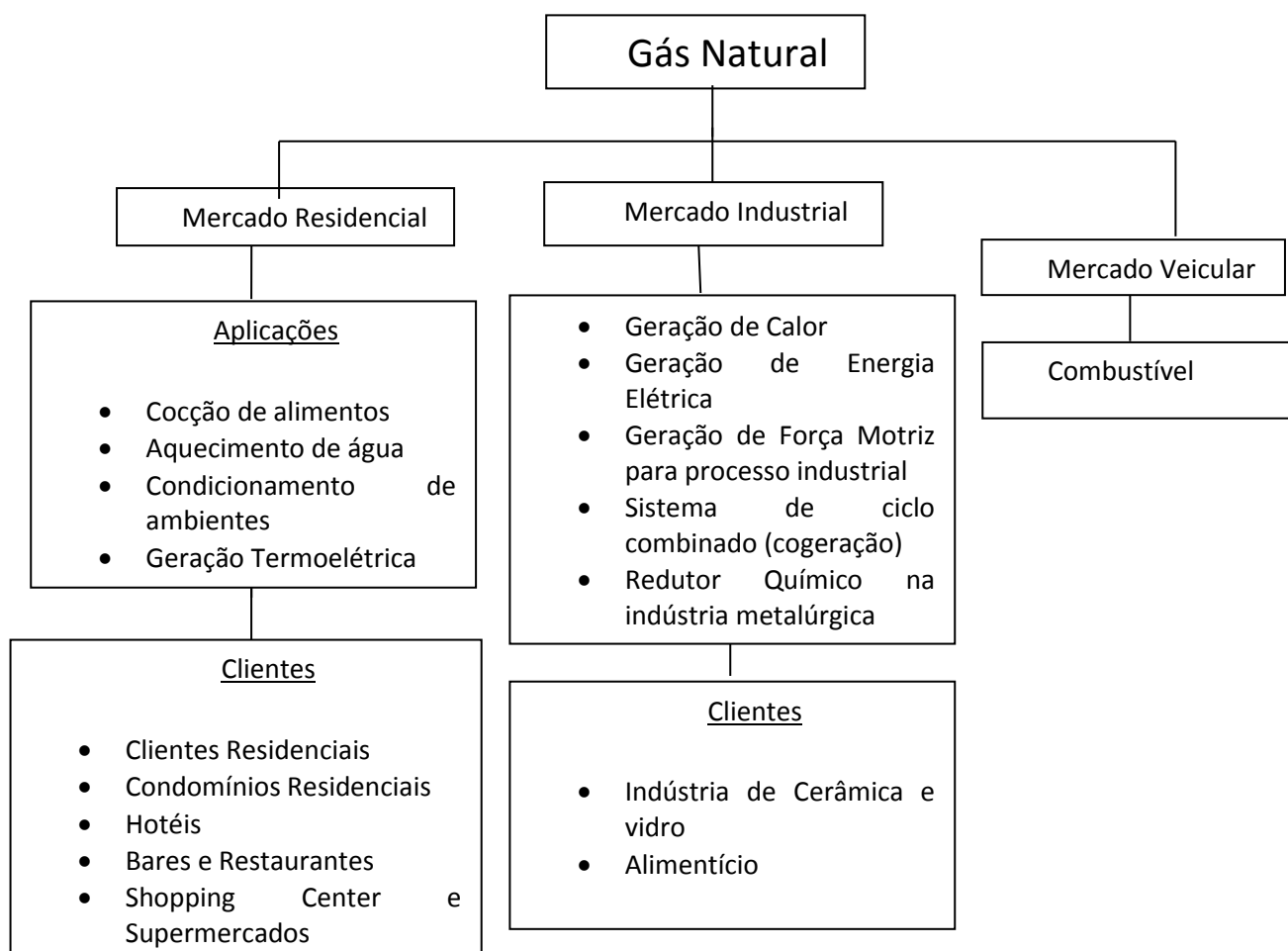


Figura 1– Fluxograma de aplicações do gás natural.

Possui três aplicações principais: na indústria de petróleo, na indústria química e como combustível. Alguns exemplos são:

Indústria petroleira: Veículo de auxílio à extração do petróleo;

Indústria química: Produzir compostos nitrogenados e como redutor siderúrgico;

Combustível: Aquecimento residencial, propulsão e geração elétrica.

Usinas de gás de ciclo combinado são mais eficientes e têm custos menores de capital do que usinas à base de carvão, além de não emitirem dióxido de enxofre nem particulados e suas emissões de NO_x e de dióxido de carbono serem cerca de 90% e de 65%, respectivamente, menores que as usinas a carvão. Estima-se que o fornecimento global de energia pelo gás aumente para 24% até 2020 (Geller, 2003).

O Brasil se destaca por ser pioneiro no uso em larga escala de combustíveis veiculares alternativos. Mundialmente, o Brasil possui a segunda maior frota de veículos leves que usam GNV (gás natural veicular) (Petrobras, 2007).

A grande desvantagem do gás é sua baixa densidade. O volume para produzir a mesma quantidade que o petróleo, por exemplo, é cerca de 1000 vezes maior (Junior, 2007). Um gasoduto de alta pressão transporta aproximadamente um quinto da energia que um oleoduto transporta, embora o transporte do gás seja mais rápido (RRI, 2007). Isso encarece o transporte para longas distâncias assim como o produto para o consumidor final.

O presente estudo analisou amostras de gás natural, dos gases de emissão da sua queima e realizou teste em um motor-gerador. Para detectar a presença de algumas impurezas utilizou-se a técnica de espectroscopia na região do infravermelho no laboratório de Combustíveis da FGA-UnB e o analisador de gases na sala de motores da FT-UnB. Os resultados serão avaliados comparando com o valor típico do gás, com as normas da ANP e com os dados da Petrobras para possível comercialização nos setores residencial, industrial e veicular no DF. Também foi realizada uma avaliação de seu rendimento e das emissões por um motor diesel funcionando com ar, gás e diesel. Definindo, assim, um possível mercado no DF para os setores industriais, de transporte e residencial. A realização deste trabalho é de interesse da FGA-UnB e CEBGAS.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal do presente trabalho é o estudo da viabilidade técnico de Gás Natural na Região do DF – Gama-DF, a ser utilizado como combustível para abastecer os mercados residenciais, comerciais, industriais e veiculares.

Os objetivos secundários são:

- Avaliar a redução de consumo de diesel em testes de motor dual fuel;
- Estudos de caracterização físico-químicas do gás natural a ser distribuído na região do DF;
- Garantir as condições de segurança na manipulação e utilização do gás natural, assim como diminuir os níveis de emissões de poluentes.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho foi dividido em capítulos para melhor entendimento dos conteúdos e proporcionar uma maior facilidade na sua leitura. O Capítulo 1 aborda aspectos introdutórios do projeto, como a motivação ligada ao tema energia e gás natural, seus objetivos e como foi estruturado o trabalho.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica com aspectos expressivos do gás natural. São abordados o panorama do gás, no cenário mundial e brasileiro incluindo seu histórico e a influência do pré-sal, os métodos de separação dos hidrocarbonetos e processamento do gás, as características físico-químicas do gás, os modais de transporte do gás e o mercado do DF.

O capítulo 3 faz referência a Gás Local/White Martins, empresa que distribui gás na forma liquefeita para diversos clientes que não possuem abastecimento por gasodutos. Ela utiliza o modal rodoviário, com carretas criogênicas.

O capítulo 4 é sobre a metodologia dos experimentos. Primeiramente, é feita uma introdução teórica sobre os testes de motor e de infravermelho que foram realizados. Segundo, são mostrados e explicados os equipamentos que foram utilizados em ambos os testes. Por último, é explicado como se deu a realização de tais testes.

O capítulo 5, Resultados e Discussões, compara os dados de consumo de um motor a diesel e do motor utilizando a tecnologia Dual Fuel e verifica os compostos dos gases de exaustão e relata sobre os espectros obtidos no infravermelho.

O capítulo 6 apresenta a conclusão final sobre a viabilidade técnica do gás, com custo relativamente baixo de instalação e com a diminuição das emissões dos poluentes e redução do consumo de combustível. Também apresenta uma proposta para a realização de trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PANORAMA DO GÁS NATURAL

2.1.1 Histórico

A indústria do gás iniciou antes mesmo da descoberta do gás natural. O gás, inicialmente, era manufaturado a partir do carvão, no fim do século XVIII, a partir do processo de gaseificação do carvão. A primeira empresa de gás manufaturado no mundo, London and Westminster Gas Light and Coke Company, iniciou a oferta de serviço de iluminação pública a gás em 1812. Devido ao baixo custo e à melhor qualidade em relação ao óleo de baleia, utilizado para iluminação, as empresas de iluminação a gás se difundiram rapidamente nos principais centros urbanos durante o século XIX (Júnior, 2007).

Apesar de diversas aplicações do gás manufaturado, como no uso do fogão e de aquecedores, a principal aplicação era para a iluminação pública até o começo do século XX. Contudo, a partir do advento da iluminação elétrica no fim século XIX, o gás começou a enfrentar uma grande concorrência. A camisa de gás foi uma das soluções tecnológicas para enfrentar a concorrência, permitindo um importante aumento na eficiência energética e na qualidade de iluminação dos lampiões a gás, o que possibilitou uma sobrevivência de décadas à indústria de gás manufaturado no setor de iluminação. A busca de inovações tecnológicas também centraram-se em novos processos de gaseificação, com maior eficiência e menor custo (Júnior, 2007).

O gás era vendido por horas de iluminação e com as novas aplicações do gás (aquecimento residencial e cocção) o gás passou a ser vendido por volume. Durante os anos 20 foi desenvolvida uma regulamentação para definir os preços e evitar que um gás com baixo poder calorífico fosse vendido ao mesmo preço de um com alto poder. A indústria do gás manufaturado, a partir do carvão ou da nafta, durou até os anos 50, devido à crise do carvão e a forte concorrência com a eletricidade e com os derivados do petróleo a indústria entrou em

declínio. Com a descoberta do gás natural, as indústrias decidiram converter a indústria do gás manufaturado para do gás natural (Júnior, 2007).

O gás natural foi utilizado inicialmente em 1821, na Fredonia, Estados Unidos, para a iluminação. A jazida do gás foi descoberta por acidente perto do centro urbano. O gás natural só era usado quando se encontrava uma jazida próxima ao local do consumo, devido o transporte do gás não possuir características ainda bem definidas. Quando descoberto alguma jazida, o gás natural era aproveitado excessivamente pela indústria e outros consumidores, pelo fato do seu baixo preço. Contudo, as jazidas se exauriam rapidamente devido ao grande consumo deixando os consumidores sem o combustível. Isso acarretou na instabilidade da indústria do gás onde diversas indústrias entravam e saíam (faliam) do mercado do gás, durante o fim do século XIX e começo do XX (Júnior, 2007).

Na década de 30, os gasodutos de longa distância começaram a se desenvolver nos EUA, e a indústria do gás deu um grande salto no ritmo do desenvolvimento. Em 1931, o primeiro gasoduto com mais de 1000 km foi construído e em 1955, cerca de 250.000 km de gasodutos haviam sido construídos (Pinto, 2010).

A difusão do gás começou na década de 20, pois era abundante, tinha um baixo preço, os dutos que o transportaram tiveram um desenvolvimento para grandes diâmetros e alta pressão e um mercado bem estabelecido. Contudo, só em 1935 que a venda de gás natural superou a do gás manufaturado para os mercados industrial e residencial, finalmente em 1948 que o gás manufaturado começou a ser substituído pelo gás natural (Pinto, 2010).

2.1.2 Panorama Mundial

No ano de 2011, o consumo de gás natural teve um aumento do consumo de 2,2% (BP Statistics), onde o principal aumento do consumo foi na China (21,5%), Arábia Saudita (13,2%) e Japão (11,6%), apesar da queda no seu principal consumidor, os EUA (-9,9%), no entanto o departamento de Energia - DOE prevê que a importação de gás natural irá dobrar entre 2001 e 2026 (Pinto, 2007). No Brasil a participação do gás ficou no patamar de 10% segundo o relatório final da BEN 2011 (Balanço Energético Nacional).

Devido a busca pela diversificação da matriz energética e de políticas de substituição do petróleo resultaram no crescimento do gás natural na matriz energética mundial, iniciando o deslocamento de papel principal do petróleo no século XX (Pinto, 2007). Com a difusão de

turbinas a gás em ciclo combinado, o consumo do gás aumentou para produção de eletricidade.

Outros fatores que também influenciaram o crescente papel do gás natural são: a crise do petróleo; mudanças geopolíticas internacionais; a evolução das tecnologias de transporte, produção e do uso do gás. No entanto, boa parte dos grandes consumidores de gás natural não são detentores de grandes reservas. Portanto, o desenvolvimento da indústria do gás foi mais rápida nas áreas que possuíam jazidas de hidrocarbonetos e que ficavam perto de centros consumidores, pelo fato do transporte do gás ser caro. O alto preço do petróleo permitiu investimentos no gás natural liquefeito que permitiu o consumo de países distantes das reservas. A América do Norte e a Europa Ocidental possuem cerca de 8,5% das reservas, como é representado na Figura 2, mas são responsáveis por quase metade do consumo mundial.

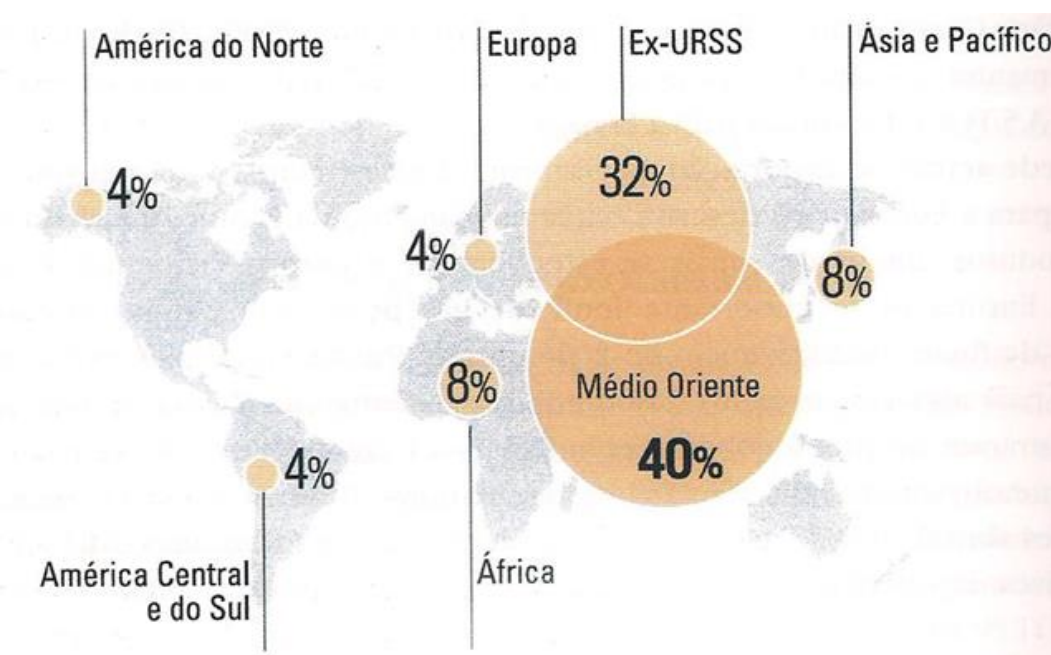


Figura 2– Reservas mundiais. Fonte: Gomes, 2007.

Como o transporte do gás é realizado principalmente por meio de dutos, os países consumidores e os países exportadores têm uma grande relação de dependência, além disso, não é possível realizar a estocagem do gás o que impossibilita a formação de estoques estratégicos. (Pinto, 2007).

A comercialização de gás nos Países asiáticos (Japão, Coreia e Taiwan) ocorre pela importação do gás natural liquefeito da própria Ásia (Indonésia, Brunei e Malásia) e,

principalmente, do Oriente Médio (Qatar e Emirados Árabe). Na Europa foram construídos dutos para o transporte do gás, ligando o principal produtor, a antiga União Soviética, aos principais mercados consumidores, a Europa Ocidental, posteriormente conectou-se a rede de dutos o norte da África e o continente Europeu (Espanha e Itália). Na América do Norte o transporte também ocorre por dutos, ligando os EUA, o Canadá e o México, sendo os EUA o principal consumidor. Na América do Sul, a conexão foi feita por dutos inicialmente entre Argentina, o principal consumidor, e a Bolívia e entre Argentina e o Chile, o Brasil se conectou posteriormente, em 1999, com a Bolívia e com a Argentina.

2.1.3 Indústria Brasileira

A indústria brasileira de gás natural teve um desenvolvimento tardio, por não haver reservas expressivas de gás e pela desestruturação do gás manufaturado. O gás canalizado foi progressivamente substituído pela eletricidade na iluminação e pelo GLP na cocção levando a desativação de diversos sistemas de gás canalizado e somente Rio de Janeiro e São Paulo mantiveram algumas empresas.

Dois fatores alteraram esse cenário, a descoberta da Bacia de Campos e a constituição promulgada de 1988. A descoberta da Bacia levou a construção do gasoduto Rio-São Paulo e a constituição definiu e reconheceu o poder dos estados para a distribuição de gás canalizado, o que atenuou conflito entre algumas empresas. Ainda na década de 80, a Petrobrás era a principal consumidora do gás, mas não estava preparada para lidar com especificidades de uma indústria de rede (Pinto, 2007), utilizando-o nas unidades industriais e nas operações de reinjeção que buscava aumentar o nível de recuperação do petróleo.

A partir da segunda metade da década de 80, o foco das políticas energéticas foram substituir os derivados do petróleo. Para tal, utilizaram alguns instrumentos na indústria do gás, como definição das prioridades de uso e estabelecimento de preços diferenciados para cada uma das finalidades do gás (combustível industrial, redutor siderúrgico, uso automotivo, residencial).

Na década de 90, o programa de privatização e as reformas setoriais, principalmente no setor elétrico, sinalizou uma nova oportunidade de investir na geração de energia, em particular das termoeletricas a gás pelo fato de exigir escalas menores e ter um tempo de retorno menor. O aumento da oferta de gás e o tratado entre o Brasil e a Bolívia para construção de um gasoduto contribuíram com a expansão da indústria do gás.

Em 1999, deu-se início das operações do Gasbol, gasoduto que faz a conexão Bolívia-Brasil. Assim pode-se comercializar o gás para além da queima associada para distribuidoras, devido o maior interesse das indústrias, e estimular a utilização do gás natural veicular.

Contudo em 2004, ocorreu o problema de abastecimento das termoelétricas a gás no Nordeste, que passava por uma seca. Essa situação contribuiu para maiores esforços para a construção de um gasoduto que ligasse o Nordeste ao Sudeste. Portanto, houve a expansão do Gasbol, das importações de GNL e da entrada de produção das Bacias de Santos e do Espírito Santo.

Algumas características da indústria do gás no Brasil que não permitem uma maior flexibilidade são:

- Não existir capacidade de estocagem;
- 75% da produção nacional vêm de campos associados, assim variando a produção de gás traria impactos a produção de petróleo;
- Praticamente toda produção de gás, associado ou não, vem de reservatórios *offshore*;
- A produção *onshore* encontra-se isolada na região Amazônica o que dificulta o atendimento da região Sudeste e Nordeste;
- Grande distância dos centros consumidores. (Pinto, 2007)

2.1.4 Incremento com a descoberta do Pré-Sal

Em 2007, houve a descoberta de grandes acumulações de petróleo e de gás em reservatórios, nas bacias do Espírito Santo, de Santos e de Campos numa área denominada Pré-Sal. A região do Pré-Sal fica a uma profundidade superior a 5 mil metros a partir do nível do mar, como mostrado na Figura 3. Estimativas preliminares indicam que a jazida de Tupi pode ter um volume recuperável entre 5 e 8 bilhões de barris de petróleo, adicionalmente a jazida de Guará pode ter um potencial de 1,1 a 2 bilhões de barris de petróleo (Petrobras).

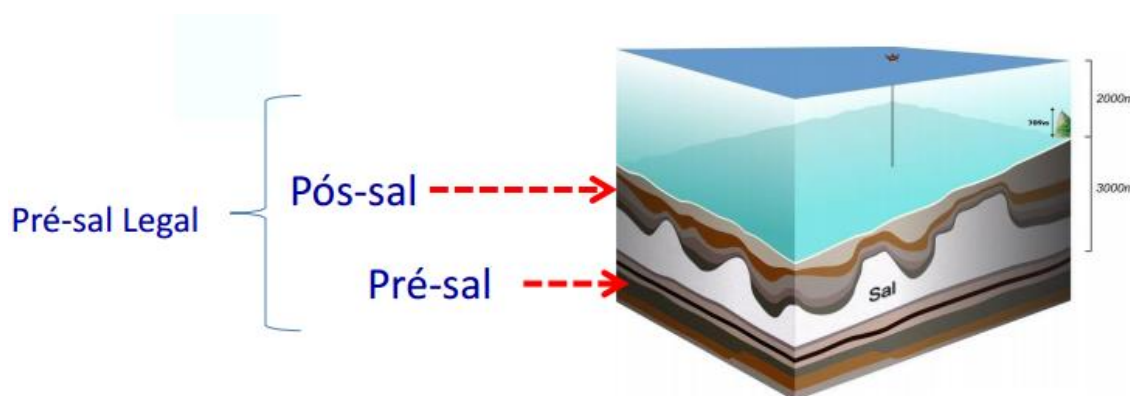


Figura 3– Pré Sal. Fonte: Silva, 2011.

Atualmente, são cerca de 200 mil barris de petróleo produzidos por dia nas Bacias de Santos e Campos, em 2017 estimasse alcançar 1 milhão de barris de petróleo por dia. É previsto também um grande aumento na produção de gás natural, apesar de grande parte estar comprometida para reinjeção nos reservatórios para auxiliar a extração do petróleo. O Brasil é o 7º maior consumidor de petróleo e o 41º de gás natural (Petrobras).

Os investimentos no Pré-Sal, no período de 2009-2013 irão ultrapassar U\$ 175 bilhões. Esse investimento vai além da compra de equipamentos, como tanques de armazenamento, turbinas, torres, filtros, guindastes (mais de 7 mil equipamentos), também visa a confecção de uniformes, a compra de marmitas para área de produção, entre outros (Schimitz, 2010).

2.1.5 Sistema Tecnológico

As atividades da indústria do gás podem ser divididas em dois segmentos: *upstream* (exploração e produção) e *downstream* (processamento, transporte e distribuição). A exploração e produção são atividades para localizar as jazidas de gás natural no subsolo, associado ou não ao petróleo, em terra (*onshore*) ou em mar (*offshore*). No processamento, o gás passa por um processo de separação das parcelas mais pesadas nas Unidades de Processamento do Gás Natural (UPGNs). A etapa do transporte ocorre majoritariamente por gasodutos de alta pressão até as distribuidoras. A última etapa, da distribuição, ocorre quando o gás chega às estações de recebimento e medição do gás e então distribuído aos consumidores finais.

A etapa *upstream* (exploração e produção) ocorre utilizando os mesmos equipamentos para a exploração de petróleo. Assim sendo, são as empresas de prospecção de petróleo que acham o gás associado ou não ao petróleo.

Nesta etapa inicial, o processo é dividido em duas partes. A primeira são os estudos geológicos para reconhecer o potencial da área. A segunda é a perfuração de poços para determinar a existência de jazidas.

Os estudos geológicos são feitos por meio de pesquisas sísmicas (“radiografia” do subsolo) que indicam possíveis áreas com potenciais jazidas. As sísmicas permitem elaborar mapas que mostram os melhores locais para a perfuração de poços. Aqui se utilizam navios sondas, plataformas submersíveis e sondas terrestres.

Uma vez que é descoberta alguma jazida no local perfurado, os hidrocarbonetos (líquido e gasoso) são retirados juntamente com água. Parte do gás é reinjetado para recuperação do reservatório e o restante segue para as UPGN (Unidades de processamento do gás).

O processamento do gás ocorre nas Unidades de Processamento de Gás Natural (UPGN’s) para a purificação, para então seguir para o transporte e para a comercialização. Esse processamento é conhecido como secagem e nele retiram-se a água, diminuem o teor de cloreto de sódio e extraem moléculas pesadas de hidrocarbonetos até um limite para preservar o poder calorífico do gás. O gás seco, pronto para comercialização, é principalmente constituído pelo gás metano, 80% a 95%.

O transporte é uma etapa crucial na cadeia do gás, pois os custos da infraestrutura do transporte podem chegar a 70% dos custos totais ao consumidor.

Existem três opções distintas de transporte:

- Por gasodutos;
- Na forma Liquefeita;
- Comprimindo;

A escolha da forma de transporte ocorre de acordo com o volume a ser transportado, a distância a ser percorrida e por onde irá cruzar (mar ou terra).

Os gasodutos transportam grandes volumes do gás, sua rota é representada na Figura 4. Os fatores que afetam o custo são a extensão, as condições da localização e do volume a ser transportado. Os principais itens de custos são os tubos, a desapropriação da área para passagem e a montagem (escavação, transporte dos tubos e soldagem). A desapropriação da terra representa 50% a 60% dos custos totais e varia de acordo com a distância. Os custos de manutenção equivalem a 2% dos custos de construção e os operacionais a 0,3% (Pinto, 2007). Dessa forma, o elevado investimento inicial é um dos obstáculos do transporte do gás.

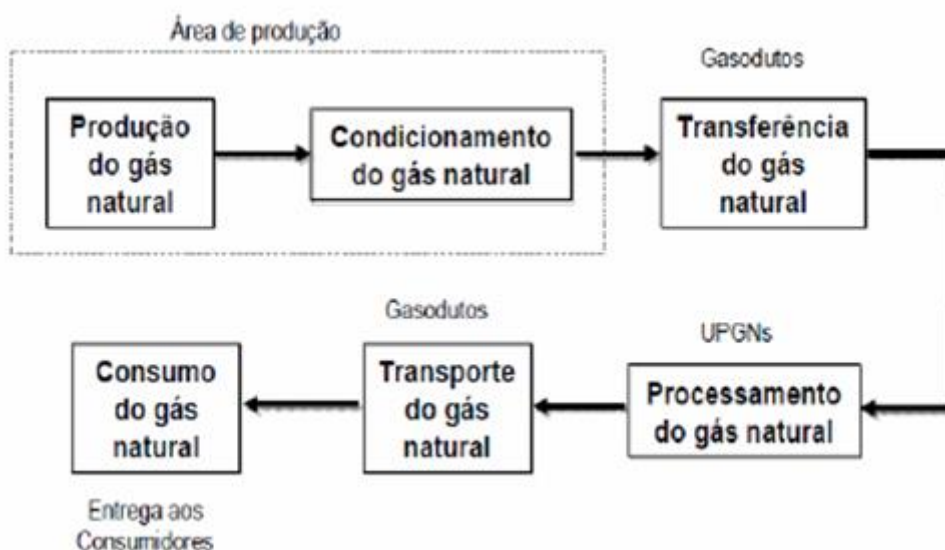


Figura 4 – Macrofluxo do Transporte de GN por gasodutos. Fonte: Contatos Pessoais 1.

O gás natural liquefeito (GNL) é uma rota onde não há infraestrutura para gasodutos ou a construção não é economicamente viável, representado pela figura 6 e 7. A liquefação do gás ocorre nas seguintes etapas: processo de resfriamento e liquefação, tratamentos adicionais de estocagem e de transporte até os terminais de recepção. Então, é realizada a estocagem, a regaseificação e o despacho do gás por gasodutos. As despesas nas centrais de liquefação representam a maior parte dos custos dessa rota (metade do custo total), portanto busca-se aumentar a capacidade das unidades de liquefação, visando reduzir custos na capacidade instalada. A temperatura dele é reduzida até -162°C , tornando-se líquido, o que reduz seu volume, como mostra a Figura 5, permitindo ser transportado por caminhões e navios apropriados.

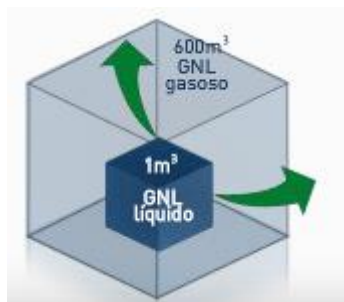


Figura 5– Comparação do volume do gás na forma líquida e na gasosa. Fonte: Petrobras, 2013.



Figura 6 – Sistema de produção até regaseificação do GNL. Fonte: SulGás, 2012.

O custo dos gasodutos reduziu-se mais rapidamente que o da cadeia do GNL, enquanto os gasodutos tiveram uma redução de 60% o da rota GNL teve uma de 30% desde 1985 (Pinto, 2007).

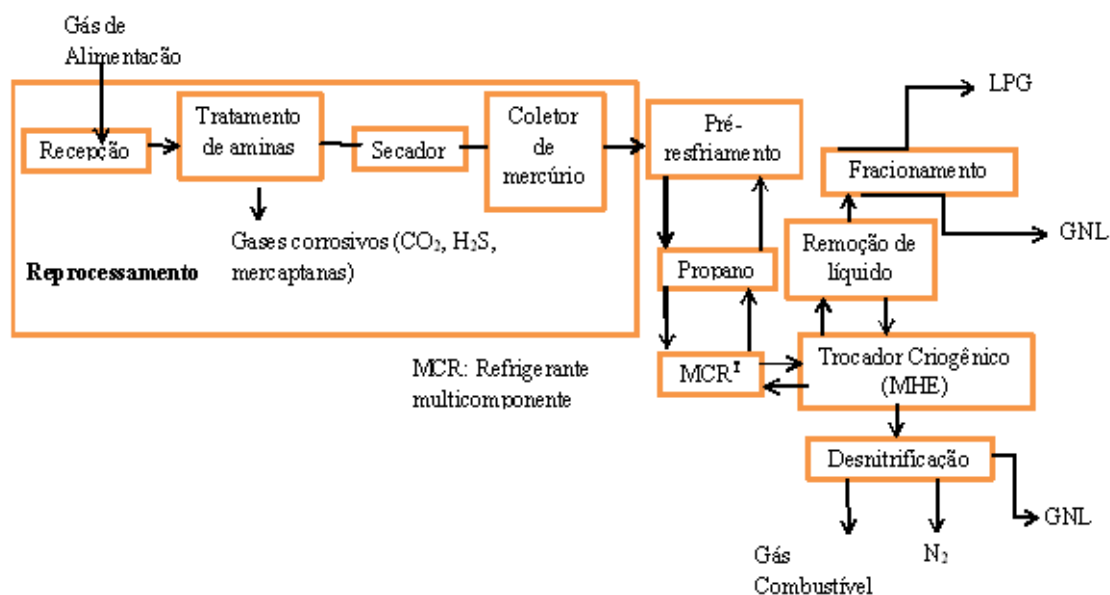


Figura 7 – Ciclo da Liquefação do GN. Fonte: Rouzaut, 2011.

O gás também pode ser transportado em cilindros (Gás Natural Comprimido - GNC) de alta taxa de compressão (até 3000 psi). Os cilindros são levados das estações de compressão até um ponto de estocagem ou gasoduto, com pressões menores. O GNC tem nichos de mercados bastante variados:

- Para consumidores ou onde o suprimento foi interrompido por acidentes ou manutenção;
- Para demanda de pico;
- Para plantas indústrias a gás que aguardam a construção de gasodutos;
- Para teste de pressão em gasodutos;
- Aproveitamento da produção do gás distantes de gasodutos.

O transporte faz a ligação entre as partes de exploração, processamento e distribuição. Chegando ao destino final, o gás é regaseificado em equipamentos especiais e injetado em dutos ou distribuído em postos. No total são 85 pontos de entrega de gás (Petrobras, 2010).

A distribuição é a última etapa do processo que permite que o gás chegue aos consumidores. Ele é distribuído nos carros, nas casas, lojas, indústrias e termelétricas. O gás não tem cheiro, mas pode ser odorizado para detectar vazões.

2.2 PROCESSAMENTO DO GÁS NATURAL

2.2.1 Jazidas do Gás

O gás natural, assim como o petróleo, tem origem a partir da matéria orgânica depositada junto com sedimentos. A necessidade de condições não-oxidantes pressupõe um ambiente de deposição composto de sedimentos de baixa permeabilidade, inibidor da ação da água circulante em seu interior. Os fatores fundamentais para a formação de combustíveis fósseis são a matéria orgânica, o sedimento e as condições termoquímicas adequadas.

O tipo de hidrocarboneto gerado, líquido ou gasoso, é determinado pela constituição da matéria orgânica original e pela intensidade do processo térmico sobre ela. A matéria orgânica vegetal lenhosa origina hidrocarbonetos gasosos, enquanto a proveniente do fitoplâncton gera o hidrocarboneto líquido (Thomas, 2001).

Com um ambiente adequado e a incorporação da matéria orgânica ao sedimento, a temperatura e a carga sedimentar começam a aumentar, conforme figura 8. Passando pelos estágios:

- **Diagênese:** ocorre até 65°C. A ação bacteriana provoca reorganização e transforma a matéria orgânica em querogênio. O produto gerado é o metano bioquímico ou biogênico.
- **Catagênese:** aumento da temperatura até 165°C. Quebra dos querogênios e formação de hidrocarbonetos.
- **Metagênese:** até 210°C. Quebra dos hidrocarbonetos líquidos e transformação em gás leve.
- **Metamorfismo:** aumento contínuo da temperatura. Leva a degradação do hidrocarboneto, deixando grafite, gás carbônico e resíduo de metano (Thomas, 2001).

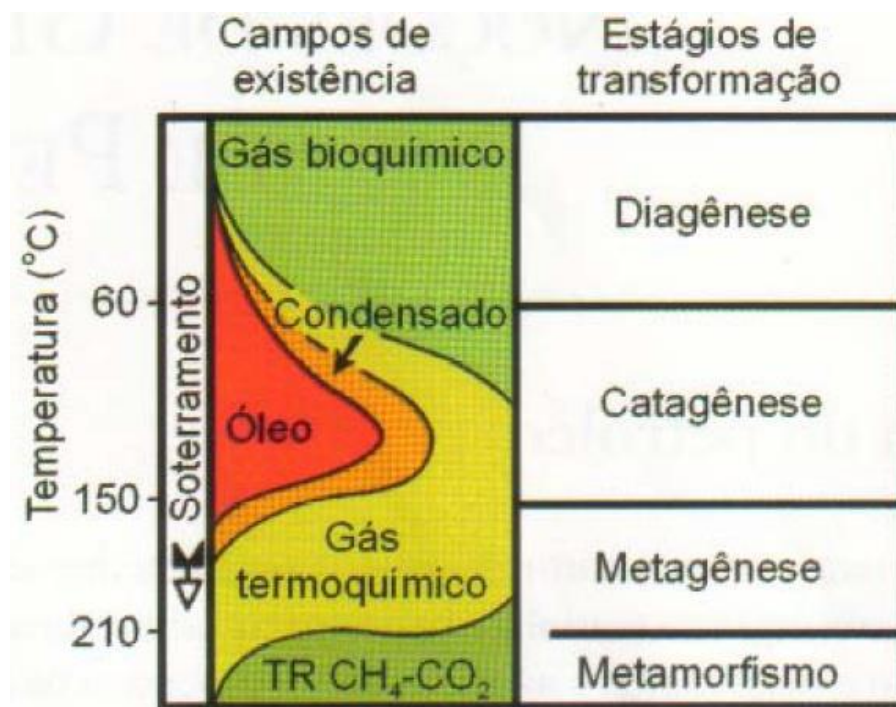


Figura 8 - Transformação termoquímica da matéria orgânica. Fonte: Thomas, 2001.

A mais importante rocha-fonte (rocha onde o petróleo é produzido) de óleo e gás é formada por sedimentos finos, ricos em matéria orgânica, soterrados a uma profundidade mínima de 500 metros, onde a rocha se comprime, diminuindo sua porosidade e, com a alta temperatura, induz os hidrocarbonetos a migrarem para cima, para um ambiente de menor pressão e maior porosidade. Esse movimento é chamado de migração primária.

A medida que o hidrocarboneto atinge materiais de maior permeabilidade ele se move mais livremente, porém, devido ao fato de sua densidade ser inferior à da água, tende a subir para a superfície. Esta migração é chamada de secundária. No seu caminho para a superfície, o hidrocarboneto, ao encontrar uma barreira relativamente impermeável, irá se acumular logo abaixo dela. Diversos tipos de rochas podem desempenhar esse papel, por exemplo, folhelhos, argilitos, sal etc. Essas rochas são chamadas de “rochas capeadoras”. A rocha permeável em que o hidrocarboneto se acumula é chamada de “rocha reservatório”.

Caso esse sistema (rocha reservatório mais a rocha capeadora) forme uma estrutura que bloqueie o movimento ascendente do carboneto, este se acumulará, formando, assim, uma estrutura armazenadora de hidrocarboneto. Esse sistema é chamado de “Armadilha” ou “trapa”. Um aspecto curioso é que as concentrações de hidrocarbonetos apresentam, devido às diferenças de densidades, três níveis de fluidos, sendo que, no superior, fica o gás; no intermediário, o petróleo; e no inferior, a água, a figura 9 mostra o esquema de um

reservatório (Thomas, 2001).



Figura 9 – Reservatório de gás associado. Fonte: PetroGasNews, 2012.

2.2.2 Sistema separação Líquido Vapor (Vasos separadores)

Como visto anteriormente, as jazidas dos combustíveis fósseis produzem petróleo, gás natural e água, juntamente com impurezas. No entanto, o interesse econômico reside apenas na produção dos hidrocarbonetos, portanto existem equipamentos que realizam o processamento dos fluidos. O processamento tem por objetivo:

- Separar as três fases (aquosa, oleosa e gasosa) nos vasos separadores;
- Tratar os hidrocarbonetos, como a retirada de água emulsionada;
- Tratamento da água para descarte ou reinjeção em poços produtores;

O processamento primário dos fluidos é constituído por vasos separadores (bifásicos ou trifásicos) que estão em série ou em paralelo e se diferem pelo número de estágios. Petróleo pesado é separado por um ou dois níveis de pressão, enquanto o leve é separado por até três níveis de pressão: alta, baixa e intermediária (Brasil, 2011).

Os gases obtidos nos níveis de baixa e intermediária pressão precisam ser comprimidos para serem levados até as unidades de tratamento. A corrente gasosa final é conhecida como gás úmido (devido a hidrocarbonetos pesados que possam condensar) que, geralmente, é encaminhada até as unidades de processamento de gás natural para reduzir o teor de hidrocarbonetos mais pesados do que o etano, gerando gás para o uso comercial. Para a exportação do gás, devem ser atendidos os requisitos de que o gás úmido, além de estar

sobre pressão especificada, não deve conter teores excessivos de gás sulfídrico (H_2S), gás carbônico (CO_2) e vapor de água (Brasil, 2011).

Os separadores são classificados em horizontais e verticais. Pelo fato de apresentarem uma maior área superficial, os separadores horizontais são mais eficientes na separação líquido/gás e são utilizados, principalmente, em sistemas que apresentam espumas e altas razões de gás/óleo. Os verticais, no entanto, requerem menor área de instalação e facilita a remoção de sedimentos depositados no fundo (Thomas, 2001).

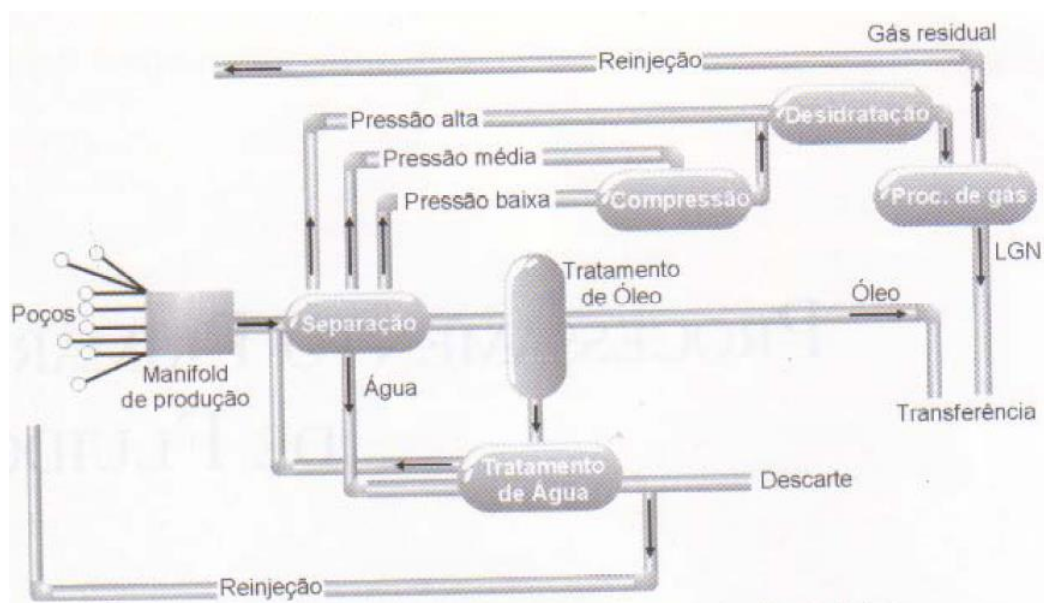


Figura 10 – Fluxograma do processamento primário de fluidos. Fonte: Thomas, 2001.

Nos separadores bifásicos, o fluido entra no vaso e choca com um defletor de entrada, que provoca uma alteração na direção e na velocidade do fluido. Devido a diferença de densidade e pela ação da gravidade, o líquido se concentra no fundo do vaso sendo retirado pelo controle de nível. O tempo de residência do fluido permite que a parte gasosa se desprenda do líquido e vá para a parte superior do vaso (Brasil, 2011). A figura 11 representa um separador bifásico horizontal.



Figura 11 – Separador Bifásico. Fonte: Thomas, 2001.

O gás separado flui sobre os defletores de entrada e segue através da secção de separação secundária. Com o fluxo de gás, as gotículas de líquidos que ficaram na fase gasosa caem na interface gás/líquido por ação da gravidade. No entanto, algumas gotas de diâmetro pequeno não são separadas então o gás passa por uma secção de aglutinação e coalescência que extraem a névoa presente no gás (Thomas, 2001).

Os separadores trifásicos são usados quando se deseja separar a água livre, água relativamente limpa. O dimensionamento é semelhante ao do bifásico, apesar da secção inferior ser maior para permitir a separação das duas fases líquidas (óleo e água) (Brasil, 2011).

Um condutor de líquido é necessário para não perturbar a interface óleo/água. Um condutor de gás é necessário para equalizar a pressão de gás entre a secção inferior de líquido e a superior de decantação. Um espalhador na saída do condutor de líquido é instalado na interface óleo/água. O óleo sobe a partir deste ponto e a água desce pelo espalhador e qualquer gotícula de óleo que for arrastada pela fase aquosa tende a subir devido à contracorrente com o fluxo de água (Thomas, 2001). A figura 12 representa um esquemático de um separador trifásico vertical.

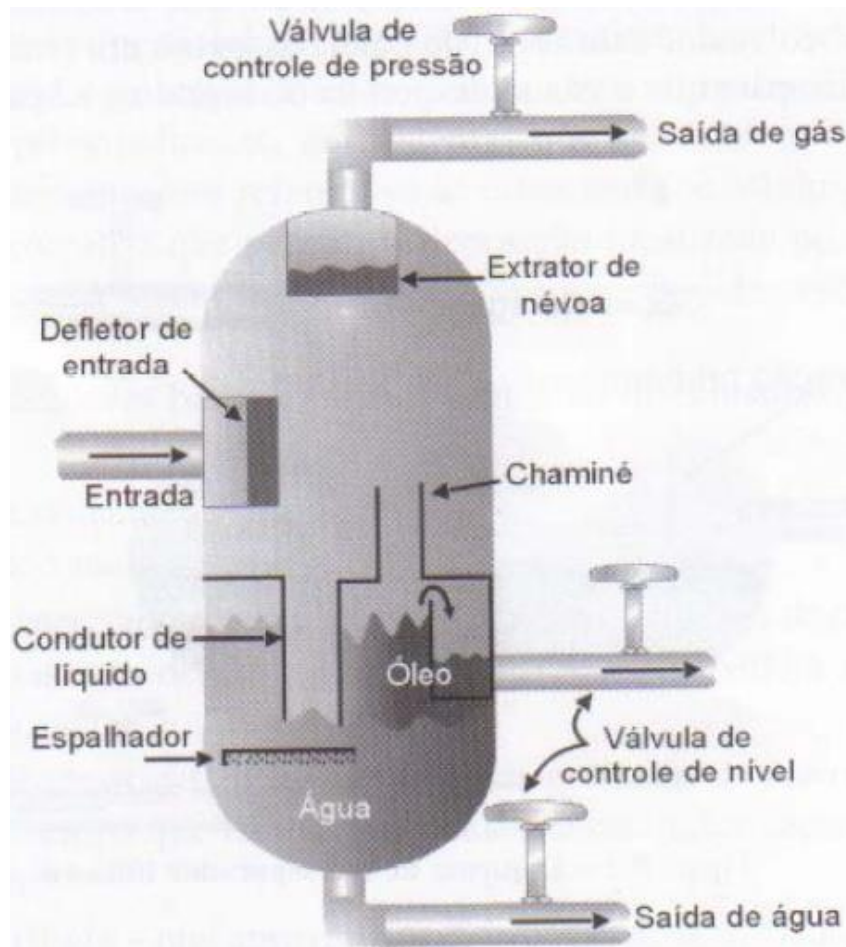


Figura 12 – Separador Trifásico. Fonte: Thomas, 2001.

Alguns problemas operacionais são comuns nos vasos separadores tanto nos bifásicos quanto nos trifásicos. Entre eles se destacam:

- Espumas: as impurezas presentes e a queda de pressão imposta aos fluidos formam as espumas. Ela dificulta o controle de nível do líquido e pode ser arrastado pelo óleo degaseificado ou pela corrente de gás;
- Obstrução por parafinas: as parafinas de alto peso molar podem se depositar e obstruir os dispositivos internos dos vasos;
- Areia e sedimentos: causa erosões nas válvulas, obstrução interna nos vasos e diminuição do tempo de residência do líquido;
- Emulsões: a água forma uma camada de emulsão sobre a fase aquosa. É um problema nos separadores trifásicos por dificultar o controle de nível da interface e reduz o tempo de residência tanto para o óleo quanto para a água diminuindo a eficiência de separação e prejudicando o tratamento do óleo;

- Arraste: ocorre pelo arraste de gotículas de líquido pelo gás e/ou pelo arraste de bolhas no líquido.

2.2.3 Tratamento do gás

Após o gás ser separado, ele deve passar por um tratamento para retirar os gases ácidos (H_2S e CO_2), corrosivos na presença de água líquida e para retirar o vapor da água presente, que podem formar hidratos que bloqueiam tubulações e provocam corrosões.

A desidratação do gás pode ser realizada por processos de absorção, com o uso de um solvente líquido, e de adsorção, que usa um sólido como sílica gel, alumina ou peneira molecular, e por permeação de membranas poliméricas (Brasil, 2011).

A absorção é realizada em um vaso onde o gás flui em contracorrente com uma solução de glicol, de grande poder higroscópico, que é posteriormente regenerada através de aquecimento retornando ao processo. A adsorção é feita por materiais que possuem grande área superficial e afinidade pela água. O adsorvente saturado é regenerado pela ação do calor (Thomas, 2001).

Outra alternativa seria a aplicação de produtos químicos inibidores, que combinam com a água livre diminuindo a temperatura de formação de hidratos. Os mais utilizados são os álcoois, que são regenerados e reticulados no processo (Thomas, 2001).

Os contaminantes ácidos causam problemas de corrosão nos dutos de escoamento. A remoção de gases ácidos pode ser efetuada através dos processos de absorção química ou física em torre de contato. As soluções de aminas são as mais usadas (Thomas, 2001). O processo é regenerativo onde não há consumo contínuo da solução de tratamento. Tem por objetivo a segurança operacional, especificação do gás para comércio e redução da corrosividade (Brasil, 2011).

O uso das aminas, figura 13, é de grande interesse por apresentarem caráter básico o que diminui a acidez e por permitirem um sistema regenerativo a custos razoáveis, serem pouco voláteis para evitar perdas por evaporação e apresentarem alta solubilidade na água para a reação ácido-base ser plena. No entanto possuem algumas desvantagens, como reagirem com outros contaminantes, sofrerem degradação em temperaturas pouco acima das utilizadas para regeneração, e em algumas ocasiões se tornarem corrosivas.

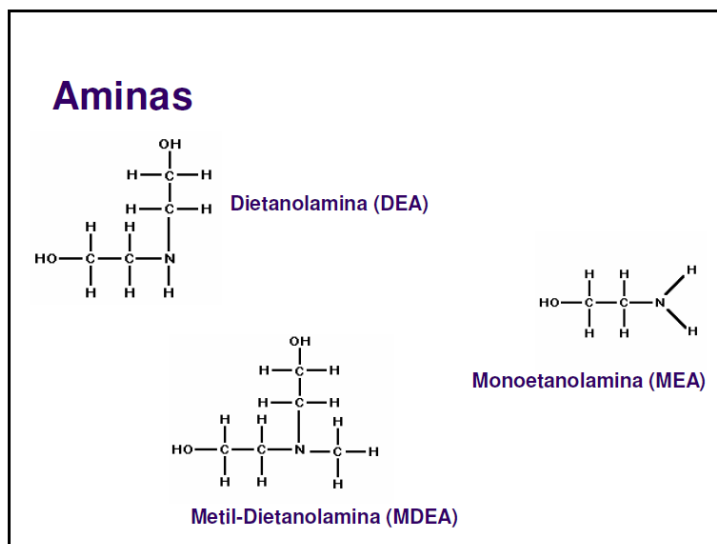


Figura 13– Aminas para remoção de gases ácidos. Fonte: Brasil, 2011.

Para remover os gases ácidos, são realizados tratamento com monoetanolamina, adsorção por peneiras moleculares e a permeação por membranas poliméricas. A figura 14 representa um processo onde o gás flui em contra-corrente em solução de monoetanolamina (MEA) de grande poder absorvedor sendo posteriormente regenerada pelo aquecimento.

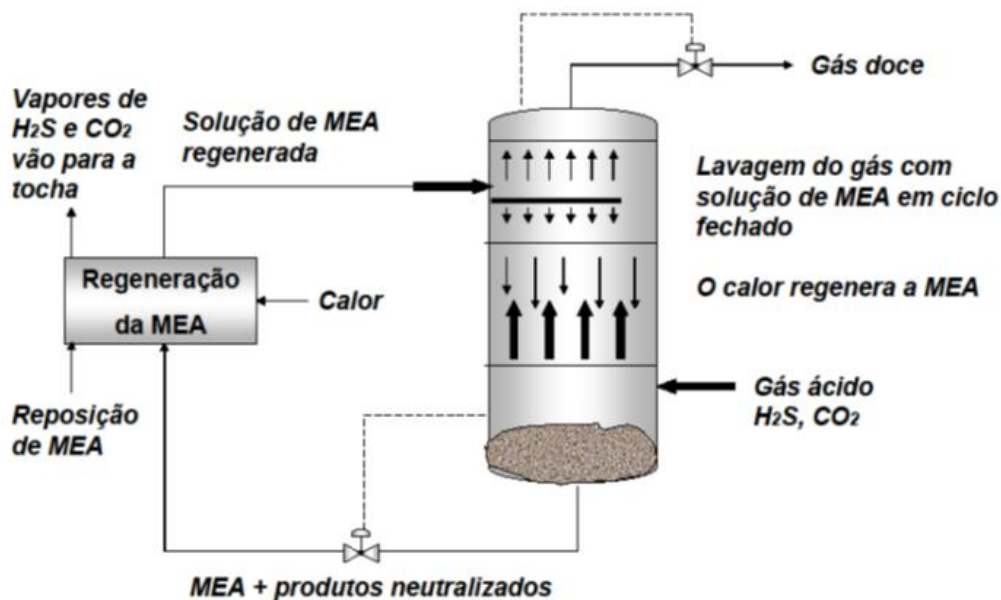
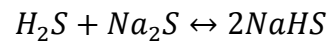
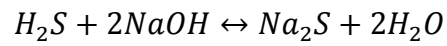
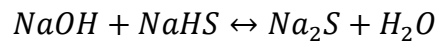
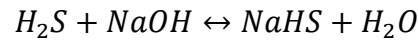


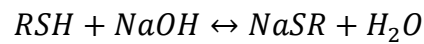
Figura 14– Remoção de H₂S com MEA. Fonte: Brasil, 2011.

O processo MEROX para a purificação do GLP utiliza hidróxido de sódio (NaOH) reagindo com o H₂S e com os mercaptans (RSH). Ocorre as seguintes reações:

Para H_2S :



Para os mercaptans:



O esquemático na figura 15 representa a torre de separação do MEROX:

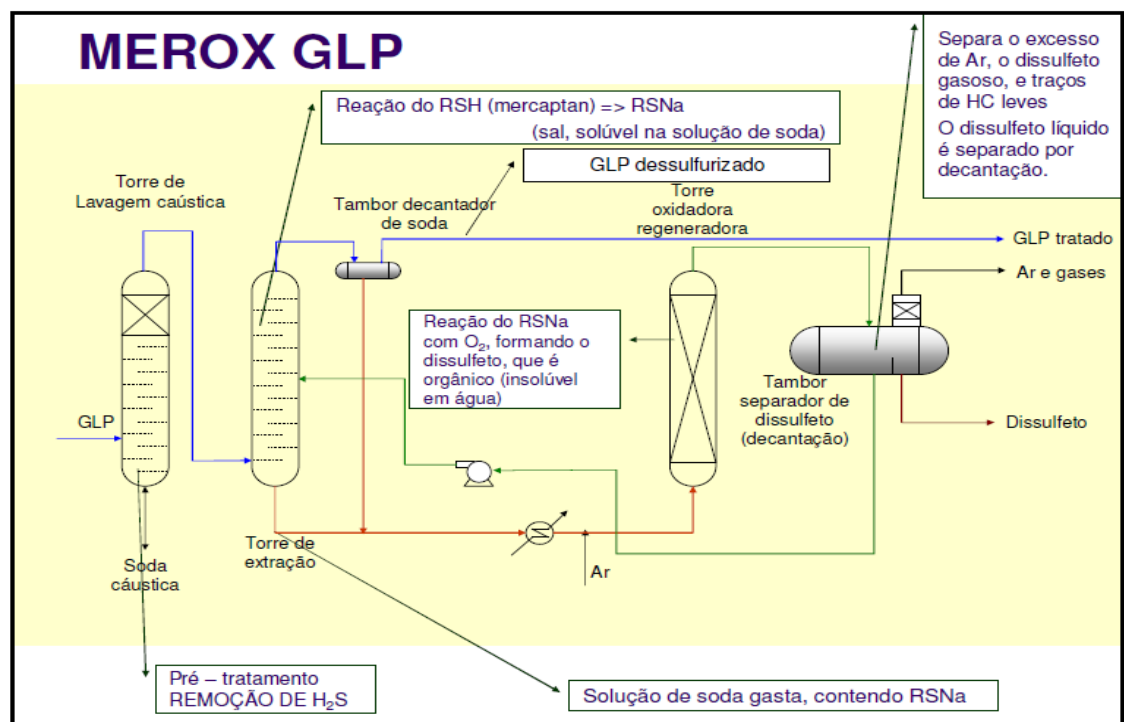


Figura 15– Operação unitária do processo MEROX GLP. Fonte: Brasil, 2011.

A tabela 1 apresenta as especificações do gás e seus respectivos tratamentos.

Tabela 1 – Tratamento e especificação do gás.

| Característica | Implicação | Solução |
|---------------------------------------|---|---|
| Alto teor de CO ₂ | Possibilidade de corrosão e redução do Índice de Wobbe | Remoção |
| Alto teor de N ₂ | Redução do poder calorífico superior e do Índice de Wobbe | Mistura com gás rico |
| Baixa pressão no ponto de entrega | Compatibilidade com terminal de distribuição | Incluir compressor auxiliar |
| Temperatura no ponto de entrega | Evitar condensação após queda de pressão e limitações do projeto do equipamento | Aquecimento/resfriamento se necessário |
| Baixo poder calorífico | Dificuldade de Comercialização | Remoção de inertes/mistura com gás ricos |
| Baixo índice de Wobbe | Dificuldade de comercialização | Remoção inertes/gás ácido |
| Alto ponto de orvalho hidrocarbonetos | Condensação do hidrocarboneto no gasoduto | Reduzir o LGN/ponto de orvalho |
| Alto teor de água | Acumulo de água/formação de hidratos e corrosão | Desidratação do gás/ inibidor de hidratos |

2.2.4 Unidade de Processamento Gás Natural (UPGN)

Quando o gás está livre da fase líquida, ele é enviado para as Unidades de Processamento de Gás Natural, onde são separadas as frações leves (metano, etano e gás seco) e as pesadas que apresentam um maior valor comercial. Assim o objetivo das UPGN's é recuperar, na forma líquida, o gás liquefeito do petróleo (GLP) e o líquido de gás natural (LGN) e especificar o gás seco para seus diversos usos (Brasil, 2011).

O esquema simplificado de uma UPGN pode ser observado na figura 16:

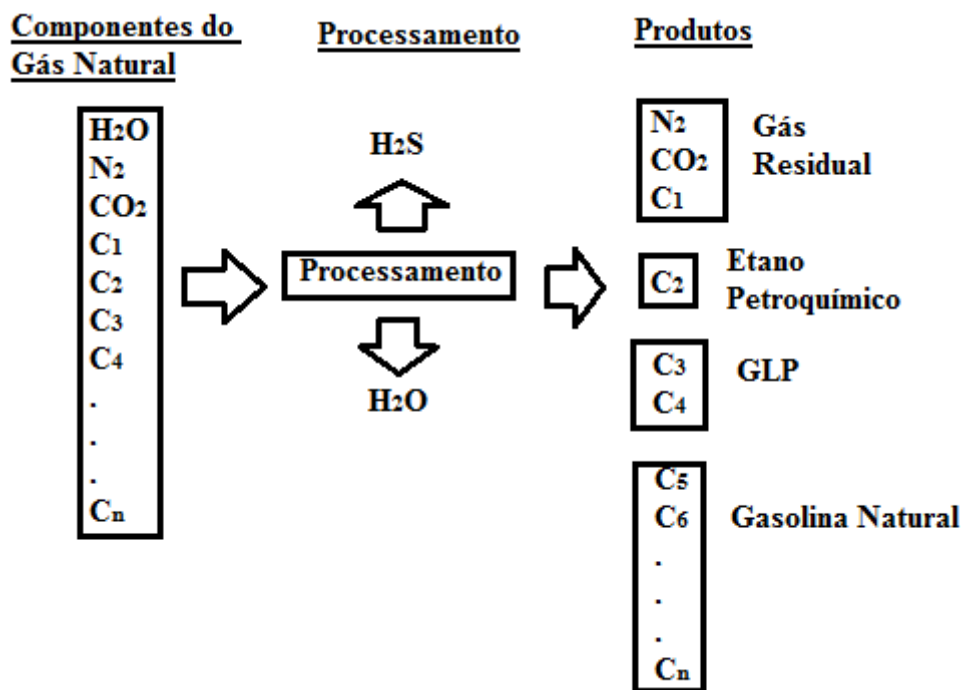


Figura 16 – Fluxograma de uma UPGN. Fonte: Contatos Pessoais 1.

Na UPGN a etapa mais importante é a redução de temperatura do gás natural, para permitir a liquefação dos hidrocarbonetos mais pesados que o etano. De uma forma simplificada os processos podem ser constituídos por: desidratação, compressão, absorção e o resfriamento. Os hidrocarbonetos recuperados são estabilizados e separados por fracionamento para a obtenção dos produtos desejados (Brasil, 2011).

Os tipos de processo escolhidos diferem entre si pela rota termodinâmica e são escolhidos com base nos fatores técnicos e econômicos e do mercado a ser atendido. Eles são:

- **Processo Joule-Thompson:** É o processo mais barato, mais simples e mais limitado. É utilizado somente quando a composição do gás necessita apenas de um ajuste no teor dos componentes mais pesados, afim de permitir o transporte em gasodutos sem que ocorra condensação. O gás se expande, de forma isoentalpica, em uma válvula provocando uma redução de pressão e, conseqüentemente, de temperatura. Pode ser utilizado como refrigeração auxiliar.
- **Refrigeração Simples:** Utilizado quando não se tem elevada exigência em relação à recuperação do gás, ou seja, quando se quer fazer um ajuste no ponto de orvalho para transporte em gasodutos. Condensação dos hidrocarbonetos mais pesados por meio da

redução da temperatura, utilizando um fluido refrigerante (usualmente propano) e em circuito fechado.

- **Absorção refrigerada:** Nesse tipo de processo é possível recuperar 50% do etano, 90% a 95% para propano e 100% para butanos e mais pesados. O gás entra em contato com um fluido auxiliar (óleo de absorção) em uma torre de alta pressão e baixa temperatura, que é obtida com o uso de fluido refrigerante (em grande parte propano) em circuito fechado.
- **Turbo expansão:** É o mais eficiente por gerar temperaturas menores que as demais (menores que -95°C) e pode ser usada quando se quer obter alta recuperação de propano no GLP (99%) e etano (85%) especificado para a indústria petroquímica, além do butano e mais pesados (100%). A temperatura do gás é reduzida, devido a expansão em uma turbina, o que provoca a condensação dos hidrocarbonetos mais pesado que se desejam separar. Algumas vezes se utiliza fluido refrigerante.

A tabela 2 mostra o nível de complexidade dos processos.

Tabela 2 – Comparação dos tipos de processo. Fonte: Contatos Pessoais 1.

| Objetivo | JT | RS | AR | TE |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Especificar ponto de orvalho | S | S | S | S |
| Especificar Gás conforme portaria 104 | N | S | S | S |
| Maximizar produção de GLP | N | N | S | S |
| Produzir etano petroquímico | N | N | N | S |

Custo e Grau de complexidade: Aumentam com o avanço para direita

2.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO QUÍMICA DO GÁS NATURAL

Gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos leves que é constituído essencialmente por metano, mais do que 80%, e possui um poder calorífico superior em torno de 9.500 kcal/m³. A sua combustão é mais limpa por emitir baixas quantidades de SO₂ e de material particulado. A tabela 3 mostra a composição típica do gás:

Tabela 3 – Composição típica do Gás Natural.

| Elementos | Associado | Não-Associado | Processado |
|--------------------------------------|------------------|----------------------|-------------------|
| Metano | 81,57 | 87,12 | 88,56 |
| Propano | 5,13 | 2,91 | 9,17 |
| I. butano | 0,94 | 0,52 | 0,42 |
| N. butano | 1,45 | 0,87 | - |
| I. pentano | 0,26 | 0,25 | - |
| N. pentano | 0,30 | 0,23 | - |
| Hexano | 0,15 | 0,18 | - |
| Heptano e superiores | 0,12 | 0,20 | - |
| Nitrogênio | 0,52 | 1,13 | 1,20 |
| Dióxido de carbono | 0,39 | 0,24 | 0,65 |
| Total | 100 | 100 | 100 |
| Densidade | 0,71 | 0,66 | 0,61 |
| Riqueza (% mol C) | 8,35 | 5,16 | 0,42 |
| Poder cal inf (kcal/m ³) | 9,916 | 9,249 | 8,621 |
| Poder cal sup (kcal/m ³) | 10,941 | 10,223 | 9,549 |

Para proteger os interesses dos consumidores quanto à qualidade do produto, a ANP determinou as especificações do gás natural mostrada na tabela 4:

Tabela 4– Especificação do gás Natural. ANP nº16, 17.6.2008 – DOU 18.6.2008

| Característica | Unidade | Norte | Nordeste | Centro-Oeste, Sudeste e Sul |
|---|----------------|-----------------|-----------------|--|
| Poder calorífico superior | kJ/m³ | 34.000 a 38.400 | 35.000 a 43.000 | |
| | kWh/m³ | 9,47 a 10,67 | 9,72 a 11,94 | |
| Índice de Wobbe | kJ/m³ | 40.500 a 45.000 | 46.500 a 53.500 | |
| Número de metano, mín. | % mol | * | 65 | |
| Metano, mín. | % mol | 68,0 | 85,0 | |
| Etano, máx. | % mol | 12,0 | 12,0 | |
| Propano, máx. | % mol | 3,0 | 6,0 | |
| Butanos e mais pesados, máx. | % mol | 1,5 | 3,0 | |
| Oxigênio, máx. | % mol | 0,8 | 0,5 | |
| Inertes (N ₂ +CO ₂), máx. | % mol | 18,0 | 8,0 | 6,0 |
| CO ₂ , máx. | % mol | 3,0 | | |
| Enxofre Total, máx. | mg/m³ | 70 | | |
| Gás sulfídrico (H ₂ S), máx. | mg/m³ | 10 | 13 | 10 |
| Ponto de orvalho de água a 1atm, máx. | °C | -39 | -39 | -45 |
| Ponto de orvalho de hidrocarbonetos a 4,5 MPa, máx. | °C | 15 | 15 | 0 |

*não especificado

O número de metano é uma característica do gás que determina sua tendência a detonação.

Em um venturi, onde a relação ar/combustível é mantida constante a vazão de energia é proporcional ao índice de Wobbe, portanto é possível prever o desempenho de um gás em um dado motor. O índice de Wobbe (IW) é determinado pela equação (1):

$$IW = \frac{PCS}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

Onde,

PCS – Poder calorífico superior (kJ/m³);

d – Densidade Relativa (adimensional);

IW – Índice de Wobbe (kJ/m³);

Na tabela 05 são comparados os poderes caloríficos de alguns combustíveis. O gás natural é o combustível que possui a menor massa específica e sua forma liquefeita é menos poluente e com maior poder calorífico.

Tabela 5– Comparação dos combustíveis. Fonte: Contatos Pessoais 1.

| Combustíveis | Poder Calorífico Superior (kcal/kg) | Massa específica (kg/m ³) | Presença de sulfatos (mg/kg) |
|------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| Gás Natural | 10.454 | 0,7 | 100 |
| GNL | 13.571 | 0,7 | - |
| Etanol | 7.090 | 791,00 | 4 |
| Diesel (50) | 10.500 | 840,00 | 50 |
| Óleo combustível | 10.085 | 1.000,00 | 5.000 |
| Gasolina | 11.220 | 740,00 | 1.000 |
| GLP | 11.750 | 550,00 | 140 |

Como uma das suas principais aplicações é como combustível veicular alguns aspectos devem ser levados em consideração. O gás possui:

- Queima limpa que conserva equipamentos minimizando os gastos com manutenção e em baixas quantidades não apresenta toxicidade, mas em grandes concentrações pode causar vômitos e asfixia, apesar de não se acumular devido à baixa densidade, além de poder ser feita a odorização para detectar vazamentos;
- Um baixo nível de emissões de compostos indesejáveis ao ambiente (S, CO, NO_x);
- Melhor rendimento do motor para veículos leves (etanol=7 km/l, gasolina=10km/l, GNV=13 km/m³);
- Alta temperatura de ignição: 650 °C;
- Limite de inflamabilidade da mistura ar+gás: 6,5% a 17% de gás natural no ar (Propano de 2,1 a 9,5%, Butano de 1,9% a 8,5%).

2.4 MODAIS DE TRANSPORTE

2.4.1 Modal Dutoviário

Dutos são tubulações onde se transporta grandes quantidades de hidrocarbonetos. Consiste no meio mais econômico e seguro de movimentação dos hidrocarbonetos, através de um sistema que interliga fontes produtoras, terminais de armazenagem, bases distribuidoras,

centrais de regaseificação e centros consumidores. São 12.104 km de dutos no Brasil, sendo que 4.244 km são de gasodutos (Cardoso, 2004)

A escolha por esse modal permite uma redução nos custos de fretes, que influenciam os preços finais da carga transportada, no tráfego de caminhões e vagões-tanque e aumenta a segurança nas estradas e vias urbanas.

Projetos sobre a tecnologia de dutos estão sendo desenvolvidos para gerenciar a corrosão dos dutos, detectar vazamentos, gerar automação e operação, determinar possíveis materiais para os dutos, aumentar capacidade de transferência, determinar novas técnicas de projeto, entre outros.

A logística da operação possui três principais etapas a certificação da qualidade do produto, o alinhamento e a operação.

Na certificação da qualidade do produto é realizada uma comparação entre o tanque do cliente e o do fornecedor. São feitas medições tanto ao início quanto no final da operação. A medição do tanque compreende a medição do nível do produto, de eventual presença de água e tomada de temperatura do produto, mesuradas pela válvulas do tanque. Amostras do produto são retiradas para servirem como corpo de prova para atestar a qualidade do produto recebido, observando a cor, limpidez e densidade estão no padrão exigido.

O alinhamento é a determinação do caminho pelo qual o produto irá percorrer através dos dutos, do fornecedor até o cliente. Isto compreende a abertura e fechamento de válvulas, sem que ocorra um desvio do fluxo.

Ao fim, se inicia a operação do duto. A cada hora é realizada uma medição de controle para comparar as quantidades movimentadas entre o fornecedor e o cliente, normalmente a tolerância é de 2%.

A Lei nº 11.909/09 estabelece três definições de gasodutos: de transferência, de escoamento de produção e de transporte.

O gasoduto de transferência é o duto destinado à movimentação de gás natural, considerando o interesse específico e exclusivo de seu proprietário, iniciando e terminando em suas próprias instalações de produção, coleta, transferência, estocagem e processamento de gás natural.

O gasoduto de escoamento da produção é o duto integrante da instalação de produção, destinado a movimentação de gás natural desde os poços produtores até instalações de processamento e tratamento ou unidades de liquefação.

O gasoduto de transporte é o gasoduto que realiza a movimentação do gás desde as instalações de processamento, estocagem ou de outros gasodutos de transporte até instalações de estocagem, outros gasodutos de transporte e pontos de entregas a concessionários estaduais de distribuição de gás natural. Os gasodutos iniciados em terminais de GNL e interligados à malha de transporte são considerados gasodutos de transporte.

2.4.2 Modal Rodoviário

No Brasil, o transporte de cargas é realizado majoritariamente pelo meio rodoviário chegando em algumas regiões a ultrapassar os 90% de utilização. Devido ao investimento na construção de estradas para interligar as unidades federativas, desde o início do país, esse modal foi privilegiado enquanto os outros eram deixados em segundo plano.

O transporte dos hidrocarbonetos líquidos ou comprimidos é realizado por caminhões-tanque. Alguns apresentam um único tanque outros apresentam tanques segmentados, o que permite o transporte de diversos produtos e a capacidade também varia.

O transporte é realizado, geralmente, levando os produtos das distribuidoras, que estão armazenados em tanques (anexo II), até os clientes.

2.4.3 Modal Hidroviário

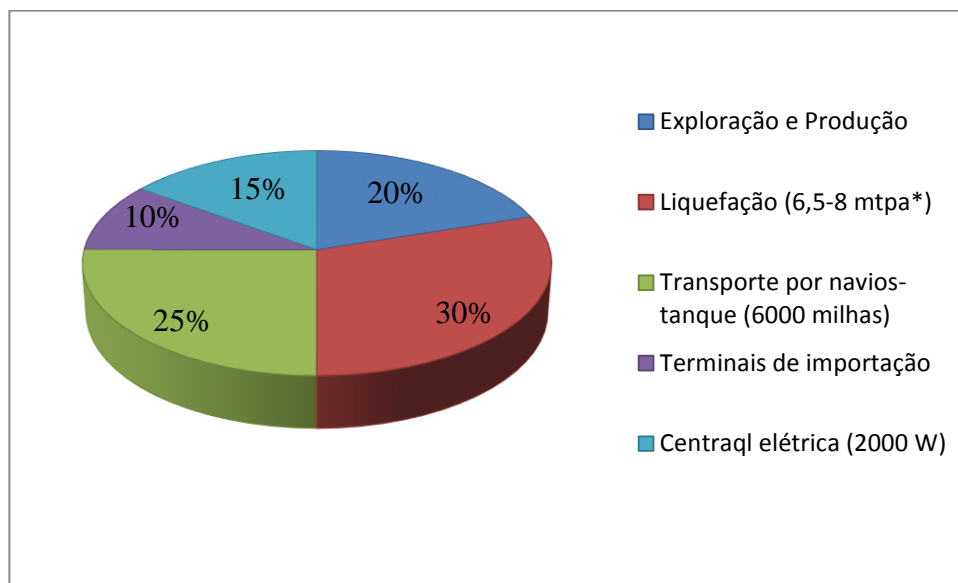
Compreende os veículos que utilizam o meio aquático para transportar suas cargas. Por ser um modal totalmente diferente, está sujeito a situações mais diversas e, por isso, possui equipamentos mais sofisticados do que os empregados em outros modais.

A escolha da embarcação a ser utilizada leva em consideração o percurso, o tipo de carga, as condições dos portos entre outros aspectos. Apesar de algumas informações referissem a somente petroleiros algumas pequenas embarcações também são utilizadas (chatas, balsas-tanque, etc.).

O transporte de cabotagem é aquele realizado ao longo da costa. É o método mais importante quando levado em consideração o modal hidroviário. Normalmente, os navios têm grandes capacidades de até 90 mil toneladas.

Mesmo o transporte permitindo operar com grandes quantidades de hidrocarbonetos líquidos em uma única operação, o que gera um custo inferior do metro cúbico transportado, comparado com o modal rodoviário, os altos custos portuários impedem que o custo/benefício seja competitivo para pequenos lotes.

A figura 17 mostra a distribuição de custos pelo transporte hidroviário na forma liquefeita.



*mtpa – Milhões de toneladas por ano

Figura 17 – Distribuição de custos de um projeto GNL. Fonte: Gomes, 2007

2.5 MERCADO DO DISTRITO FEDERAL

Pelo fato de não haver gasoduto na região do Distrito Federal, o GN chega à região via o modal rodoviário na forma liquefeita (GNL). O processo de liquefação do gás é realizado na cidade de Paulínia, São Paulo, de onde o GN é transportado pela empresa Gás Local. Dentro dos custos do gás, está o transporte rodoviário, que acaba sendo fator relevante na tarifa do mesmo. O GN é comercializado em m³ (metros cúbicos).

Atualmente, o GN consumido no Distrito Federal é apenas para uso veicular (GNV). Existem dois postos de abastecimento de GN no Distrito Feral, um localizado na Candangolândia (Posto Guarapari) e outro instalado no Setor de Indústria e Abastecimento (Posto Gasol). A Tabela 6 está relacionada aos dados atuais sobre o GN, ou seja, se referem somente ao GNV.

Tabela 6 – Dados do Gás Natural. Fonte: Contatos Pessoais 2.

| | |
|--|-----------------|
| Preço do GN Vendido pelos Postos do DF | 2,45 (R\$) |
| Média Diária de GN Consumida no DF | 8951 (m³) |
| Volume Mensal de GN que chega ao DF aos Postos | 287.864,30 (m³) |

A frota veicular do DF é composta por 1.403.788 veículos, segundo o DETRAN (dezembro de 2012) e teve uma taxa de crescimento de 6,5% com relação ao ano anterior. Segundo a oficina GNV Equipamentos, cinco veículos são convertidos por semana para funcionarem a GN no DF.

Como mostrado anteriormente, a empresa CEBGAS (anexo I), no futuro, terá como proposta atender outros setores além do GNV, tais como:

- Setor Residencial.
- Setor Industrial.
- Setor Comercial.

O potencial de GN para todo o Distrito Federal está apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Potencial do Gás Natural para os Setores a serem Atendidos. Fonte: Contatos Pessoais 2.

| Mercado | Potencial (m³/dia) |
|----------------|---------------------------|
| Residencial | 60.600 |
| Comercial | 32.600 |
| Industrial | 24.000 |
| Veicular | 128.000 |

Além do GN poluir menos que os demais combustíveis, emitindo menos poluentes ao ar, ele tem um rendimento maior se comparado aos demais combustíveis de motores do ciclo Otto, conforme a Tabela 8.

Tabela 8 – Comparação do consumo de alguns combustíveis. Fonte: Contatos Pessoais 2.

| Combustível | Consumo |
|--------------------|----------------------|
| Etanol | 7 km/l |
| Gasolina | 10 km/l |
| GNV | 13 km/m ³ |

3. GÁS LOCAL

A empresa Gás Local surgiu com uma parceria entre a Petrobras e a White Martins (anexo IV). A Gás Local é a transportadora de GNL para regiões onde não tem abastecimento de gás natural por meio de gasodutos no Brasil. Utiliza o modal rodoviário por meio de carretas criogênicas (anexo III) com capacidade de 30 mil m³ de GNL. A temperatura do GNL está a -162°C e ocupa um volume aproximadamente 600 vezes menor que o gás natural.

O Gás chega por gasoduto, o Gasbol, e então passa por um sistema de tratamento, desidratação, separação e resfriamento. No tratamento são retirados o CO₂ e gases ácidos com o uso de aminas; a desidratação retira a água que pode ocasionar a formação de hidratos; a separação retira a parte pesada do gás, como o butano; o resfriamento é realizado pelo processo Joule Thompson. Quando entregue aos clientes, o gás passa pelas UAG (Unidade de Regaseificação), onde fica estocado em taques criogênicos, e então é regaseificado e odorizado para suas devidas aplicações.

Atende clientes nos estados do Distrito Federal, Espírito Santo, Goiás, Minas Gerais, Paraná, Rio de Janeiro e São Paulo com uma frota de aproximadamente 25 carretas. Recentemente, fizeram a aquisição de uma carreta que utiliza a tecnologia Dual Fuel com GNL e Diesel, o 460 Euro 5 da Volvo. Funciona com uma mistura de 75% de metano e 25% de Diesel, o GNL é armazenado em um tanque criogênico passa por um evaporador e então

para o misturador ar/gás, por fim a mistura é levada até o motor de compressão que é alimentado conjuntamente com Diesel. A tecnologia empregada reduz emissões de gases do efeito estufa e a dependência do petróleo. O veículo também cumpre com os padrões de emissões da Euro V (Anexo V) e tem potencial para manter o padrão da Euro VI sem complexas tecnologias de tratamento dos gases de exaustão.

4. METODOLOGIA

4.1 INTRODUÇÃO EXPERIMENTAL

4.1.1 Espectroscopia FTIR

A espectroscopia estuda a interação da radiação eletromagnética com a matéria. Normalmente, transições eletrônicas estão situadas na região do ultravioleta/visível e as vibracionais na região do infravermelho.

O espectro de infravermelho de um composto é considerado uma característica físico química, portanto importante na identificação de compostos. Possibilita também a análise quantitativa de mistura de compostos, como a intensidade da banda é proporcional à concentração do componente que causou essa banda, a quantidade pode ser determinada através da curva de calibração construída a partir de concentrações conhecidas.

A espectroscopia na região do infravermelho é uma técnica de inestimável importância na análise orgânica qualitativa. Também apresenta enorme relevância na determinação da pureza e quantificação de substâncias orgânicas, bem como no controle e acompanhamento de reações e processos de separação. A matéria exposta a este tipo de radiação passa a demonstrar transições vibracionais a nível molecular (Kawano, 2002).

A região do infravermelho estende-se de $0,75\ \mu\text{m}$ até 1mm , mas a região mais utilizada fica situado entre $2,5$ e $25\ \mu\text{m}$ (4000 a $400\ \text{cm}^{-1}$) chamada de região fundamental ou infravermelho médio. A região de baixa frequência (600 a $200\ \text{cm}^{-1}$) é chamada de infravermelho longínquo e a de alta frequência ($4000\ \text{cm}^{-1}$ até a região do visível) é de infravermelho próximo.

A base do FTIR é o interferômetro de Michelson, vide figura 18. Nesse sistema, a radiação de uma fonte monocromática é dividida em dois feixes iguais no divisor de feixe (beamsplitter). Um dos feixes (A) segue em direção ao espelho de posição fixa que reflete e

volta ao divisor de feixe, onde parte volta a fonte e a outra vai ao detector. O outro feixe (B) vai em direção ao espelho móvel, o espelho móvel reflete e parte do feixe volta para a fonte e outra parte para o detector. Se a posição do espelho é mesma tal que o feixe B percorre a mesma distância que o feixe A, então os dois feixes estão em fase, reforçando um ao outro e nesse caso a energia que chega ao detector será máxima. Caso a posição do espelho seja tal que o caminho do feixe B seja diferente do feixe A, com 90° fora de fase, os dois se cancelaram e a energia que chega ao detector é mínima. Assim, é formado um interferograma (Luz, 2003).

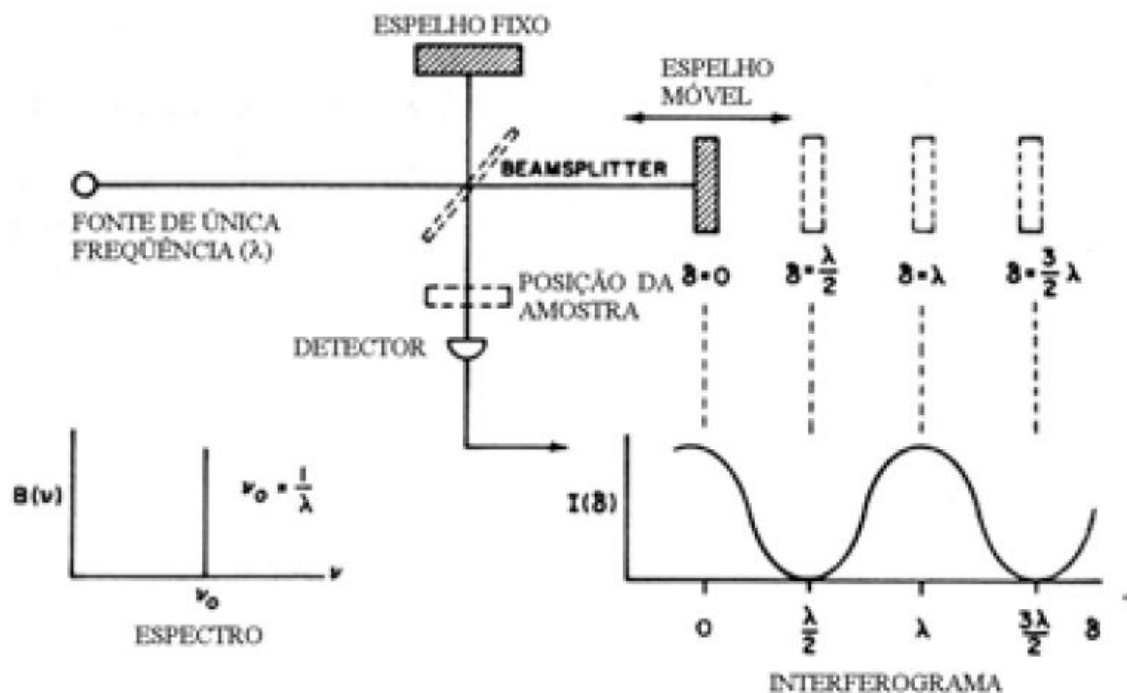


Figura 18 - Diagrama de blocos com principais componentes de um espectrômetro FTIR.

Fonte: Luz, 2003.

À medida que o espelho móvel percorre uma distância é formado um interferograma. A intensidade da radiação que chega no detector varia em função do coseno da retardação ótica (δ). Se a fonte for policromática e contínua, o interferograma pode ser representado como soma dos cosenos das ondas e esta soma torna-se uma integral de acordo com a equação (2) (Luz, 2003):

$$I(\delta) = \int_0^{+\infty} B(\bar{\nu}) \cos(2\pi\bar{\nu}\delta) d\bar{\nu} \quad (2)$$

Onde $I(\delta)$ é a intensidade de radiação e δ é a retardação ótica.

Apesar do interferograma conter toda informação que fornecida pelo espectrômetro sobre um dado conjunto de condições, a forma com que a informação se apresenta não é muito útil. Utiliza-se então a transformada de Fourier convertendo em espectro pela relação das intensidades com as respectivas frequências (Luz, 2003). A relação é dada pela equação (3):

$$B(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\delta) \cos(2\pi\nu\delta) d\delta \quad (3)$$

Onde B é a intensidade do espectro.

4.1.2 Espectroscopia ATR

Essa espectroscopia de Refletância Total Atenuada é utilizada para determinar materiais densos ou com alta absorção, como a gasolina, soluções aquosas, diesel e biodiesel.

O funcionamento ocorre pelo fato de quando um feixe de radiação mais denso (cristal ATR) para um meio menos denso (amostra), ocorre a reflexão. A fração do feixe de luz incidente que é refletida aumenta conforme o ângulo de incidência, e quando excede determinado ângulo crítico a reflexão é completa. No ponto de reflexão o feixe atua como se penetrasse a uma pequena distância dentro da amostra. Essa penetração é conhecida como onda evanescente, se a amostra absorve certo comprimento da onda, há uma atenuação dos feixe a comprimentos de onda correspondentes às bandas de absorção no infravermelho, o que origina o espectro (Luz, 2003).

4.1.3 Teste de motor (Sistema Dual-Fuel)

Motores de ciclo diesel caracterizam-se pela ignição por compressão. O fluido de trabalho, geralmente o ar, é comprimido sem ser misturado ao combustível e quando o combustível é injetado junto ao fluido comprimido quente, o combustível se inflama. Esse motor geralmente impulsiona veículos de cargas pesadas, como caminhões, navios, trens.

Os motores de ciclo diesel são mais robustos por terem uma taxa de compressão elevada acima de 17:1 e possuem rendimento térmico maior se comparado ao de ciclo Otto (Orlando, 1998). A tabela 9 compara a taxa de compressão e o rendimento térmico para diferentes motores.

Tabela 9 - Taxa de compressão e rendimento Térmico de motores. Fonte: Orlando, 1998.

| Motores | Taxa de Compressão | Rendimento Térmico |
|----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Motor dual-fuel | 17 | 44% |
| Ciclo diesel Tradicional | 17 | 42% |
| Ciclo Otto (mistura pobre) | 11 | 36% |
| Ciclo Otto Tradicional | 11 | 27% |

O fato do poder calorífico do gás natural ser equivalente ao do óleo diesel mineral, cerca de 98,8% (Orlando, 1998) em termos volumétricos, 1 m³ de gás para 1 litro de diesel, favorece o uso do gás em motores de ciclo diesel.

Apesar de não haver centelha na ignição do motor, esses motores podem ser alimentados por gás, desde que haja a “injeção piloto” de um combustível, assim o motor aspira e comprime a mistura ar/gás natural. Quando uma pequena parcela do óleo diesel é injetada no cilindro se inicia a combustão que se comporta de forma semelhante à combustão por centelha. O ciclo do motor a gás/diesel é um ciclo misto, com características semelhantes ao do ciclo diesel até a injeção piloto e a do Otto após esta injeção.

O ciclo se inicia como um motor a diesel, com fornecimento de calor a pressão constante. Logo após a combustão da mistura o motor segue no ciclo Otto, com fornecimento de calor a volume constante. Pelo fato da quantidade de Diesel ser relativamente menor que a mistura de Ar mais GNV, o motor se comporta como ciclo Otto (BET, 1991). Um ciclo hipotético dos diagrama Temperatura-Entropia (Ts) e PressãoxVolume (PV) é representado na figura 19.

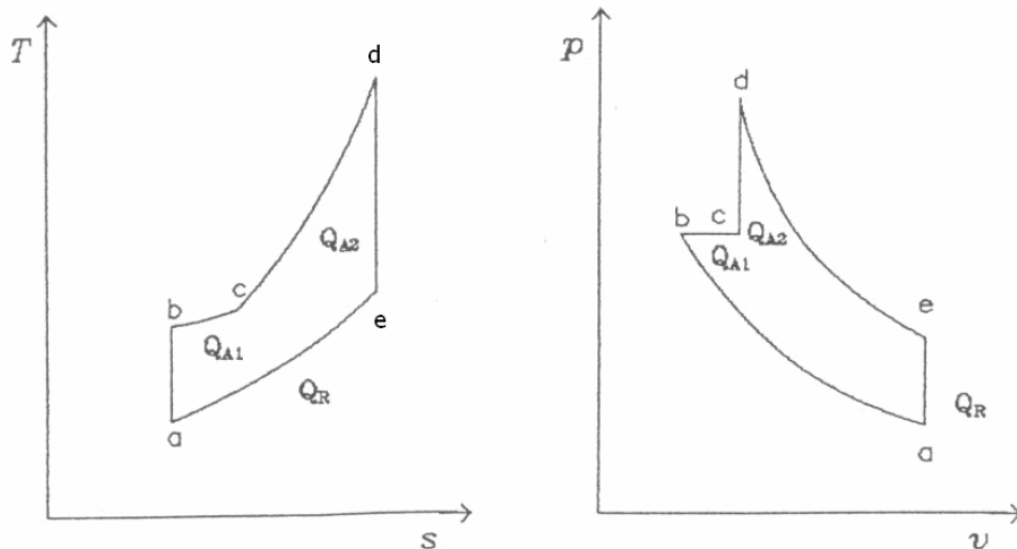


Figura 19 - Ciclo Termodinâmico do Motor Dual Fuel. Fonte: BET, 1991.

É realizada uma pequena modificação no motor diesel instalando-se um “kit” sem modificar a estrutura, mantendo um ciclo mais eficiente. A injeção piloto é responsável por aproximadamente 20% da energia total fornecida ao motor (Petrobras, 2007).

Vantagens da tecnologia Dual – Fuel:

- Pequenas alterações no motor;
- Flexibilidade de utilização (diesel ou gás + diesel);
- Maior autonomia (km/dia);
- Possibilidade da operação do motor com mesmo torque e potência do motor original;
- Redução de material particulado;
- Redução dos poluentes como NO_x e CO_2 (Orlando, 1998);

A figura 20 esquematiza a tecnologia Dual Fuel utilizada pelo CENPES. Onde: 1 – redutor de pressão; 2 – Arrefecimento do redutor; 3 – Misturador ar/combustível; 4 – Acionamento Hidráulico do misturador; 5- Válvula solenoide de acionamento; 6 – Válvula de pressão; 7 – Dispositivo dosador da injeção piloto da bomba de injeção; 8 – Central de controle eletrônica; 9 – Chave seletora; 10 – Válvula de abastecimento; 11 – Tubulação do sistema de alta pressão; 12 – Cilindros de armazenamento; 13 – Válvula de segurança.

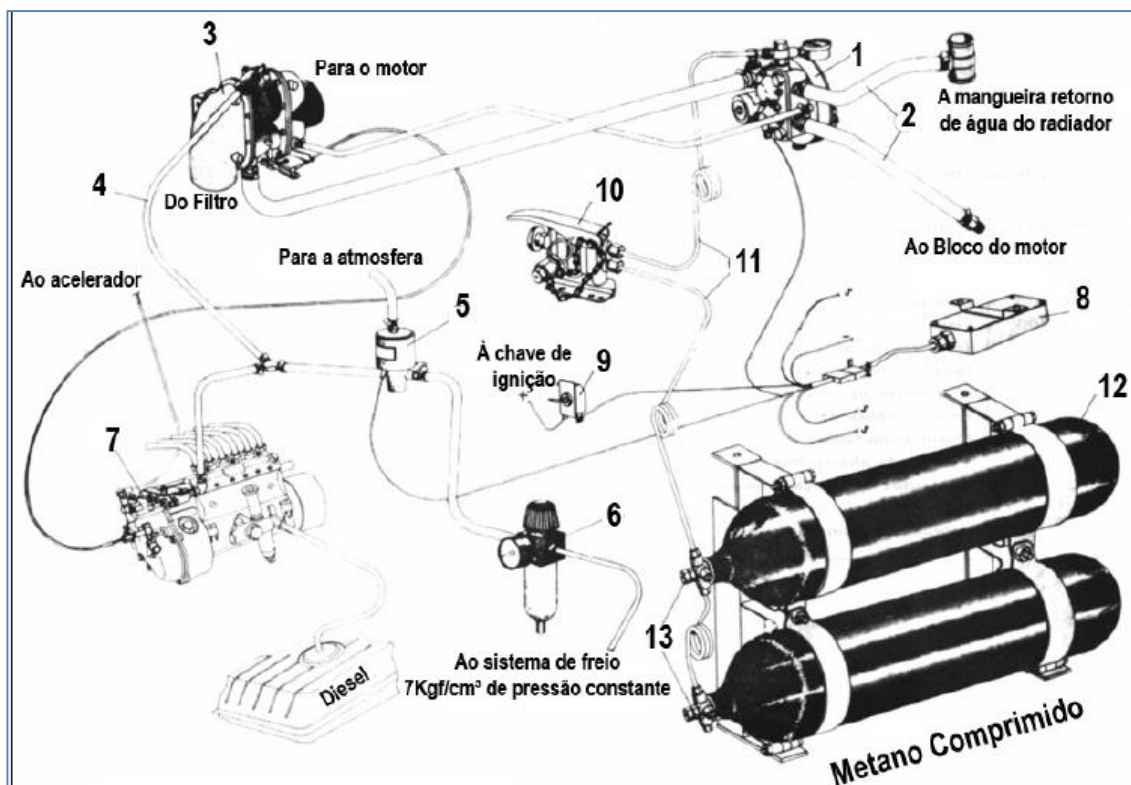


Figura 20 - Diagrama Dual Fuel com dispositivo do CENPES. Fonte: Latres, 1991.

4.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Nos testes de motor, tanto funcionando com diesel comercial quanto com a mistura dual fuel, foram verificadas as emissões quantitativas de HC, CO e CO₂ e qualitativa do Material Particulado e do NO_x. Foi realizada uma avaliação qualitativa dos componentes do diesel usado, do GNV comercializado no DF e das emissões do motor. Para tais resultados foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

Bancada de Resistências:

A bancada de resistências simula a carga que seria requerida no motor. O aumento do número de resistências gera um aumento na potência requerida e por isso o consumo do combustível aumenta. A carga é expressa como potência ($P=R \cdot I^2$) pelo fato da bancada apresentar resistências lineares que estão submetidas a uma mesma corrente. A carga chega até 11 kW.



Figura 21 - Bancada de Resistências.

Bateria 12 V Lubax:

A bateria serve para dar a ignição inicial, quando se roda a chave, no motor.

Cilindro:

É onde foi armazenado o gás, a uma alta pressão, para ser utilizado como combustível. São fabricados a partir de aço sem costura ou por chapa plana embutida, utiliza como material aço médio e manganês ou aço cromo molibdênio. O volume do cilindro utilizado é de aproximadamente 20 m^3 , pode ser visualizado na figura 22.



Figura 22 - Cilindro com GNV.

Galão de diesel:

Onde foi armazenado o diesel comercial para realizar os testes de motores e verificar o seu consumo com o auxílio de uma balança. Foi utilizado tanto no teste do motor a diesel quanto no teste dual fuel.

Gerador à Diesel Heiner:

Alternador Síncrono com uma potência de 12,5 kVA, com um fator de potência de 0,8 e uma rotação de 1800 rpm. É mostrado na figura 23.



Figura 23 - Gerador à Diesel.

Identificador de gases PC-MULTIGAS NAPRO:

Recebe parte dos gases de exaustão e verifica as quantidades de HC em ppm (partes por milhão), CO e CO₂ em porcentagem de volume. Vide figura 24.



Figura 24 - Analisador de Gases.

Material FTIR:

O equipamento FTIR marca Thermo Scientific- Modelo IS 10, figura 25, utilizado para registrar os espectros correspondentes aos compostos presente na mostra dos gases de exaustão, e da mistura B5, B100 e B0. Este equipamento encontra-se instalado no Laboratório de Energia da FGA-UnB.

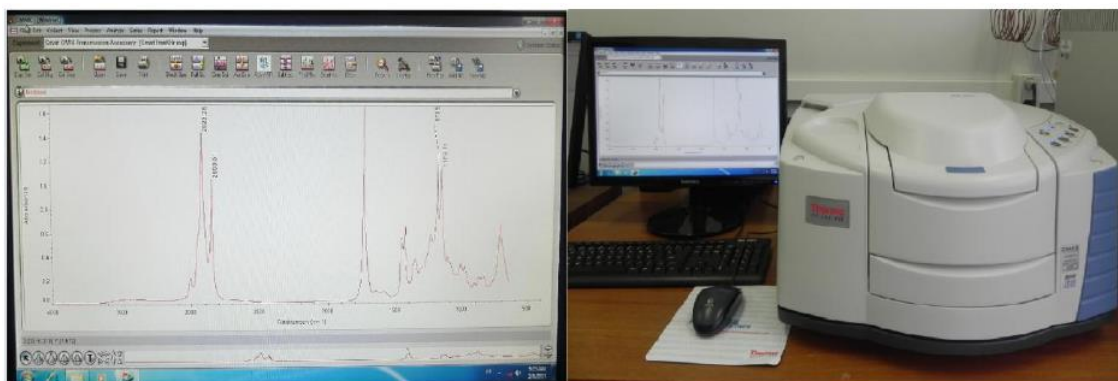


Figura 25 – Equipamento de espectroscopia FTIR marca Thermo Scientific- Modelo IS 10 com espectro em detalhe.

Misturador:

É um dispositivo mecânico que utiliza o efeito *venturi* para garantir uma correta mistura Ar/Combustível entre o Gás Natural e o ar. O misturador acoplado a entrada de ar do gerador pode ser visto na figura 26.



Figura 26 – Misturador Acoplado ao Motor.

Redutor de Pressão:

Recebe o gás a alta pressão do cilindro, reduzindo-o a pressão atmosférica, por meio de câmaras redutoras. Mostrado na figura 27. A câmara redutora esta circulada.



Figura 27 - Redutor de Pressão.

Válvula de Abastecimento:

Local que realiza o abastecimento do GNV no cilindro, figura 28. O abastecimento e feito na região circulada.



Figura 28 - Válvula de Abastecimento.

Válvula de Segurança:

É um dispositivo de segurança que possibilita a interrupção do fluxo de gás em caso de rompimento da tubulação de fornecimento de GNV ao redutor. Mostrado na figura 29.



Figura 29 – Válvula de segurança.

4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Inicialmente, foram realizados testes no motor somente com o Diesel Comercial. A ignição ocorreu ao rodar a chave do motor e abaixar as alavancas dos pistões. O Gerador era alimentado com Diesel comercial e sua carga foi variada na bancada de resistências, o que possibilitou a obtenção dos diferentes níveis de consumo do combustível sobre os diferentes níveis de carga. A mensuração do consumo foi realizado com a medição da massa inicial e

final em uma balança durante o período de um minuto. Os dados dos Gases de exaustão foram verificados no analisador *PC MULTIGAS*.

Após o teste com o Diesel, foram realizadas algumas modificações no gerador para testar a tecnologia Dual Fuel. Inicialmente, foi acoplado o redutor à válvula de segurança do cilindro e, em seguida, o misturador foi colocado na entrada de ar do motor e ligado ao redutor por uma mangueira e uma válvula auxiliar e, então, o redutor foi conectado à bateria. Deu-se a ignição do motor com as válvulas do cilindro ainda fechadas. Quando o motor já estava em operação, regulou-se às válvulas auxiliar do cilindro e da distribuição de diesel para distribuir uma quantidade mínima de diesel com o motor mantendo a mesma rotação. O processo foi realizado para cargas nula, 2 kW, 4 kW, 6 kW, 8 kW e 10 kW. A montagem pode ser melhor visualizada na figura 30.

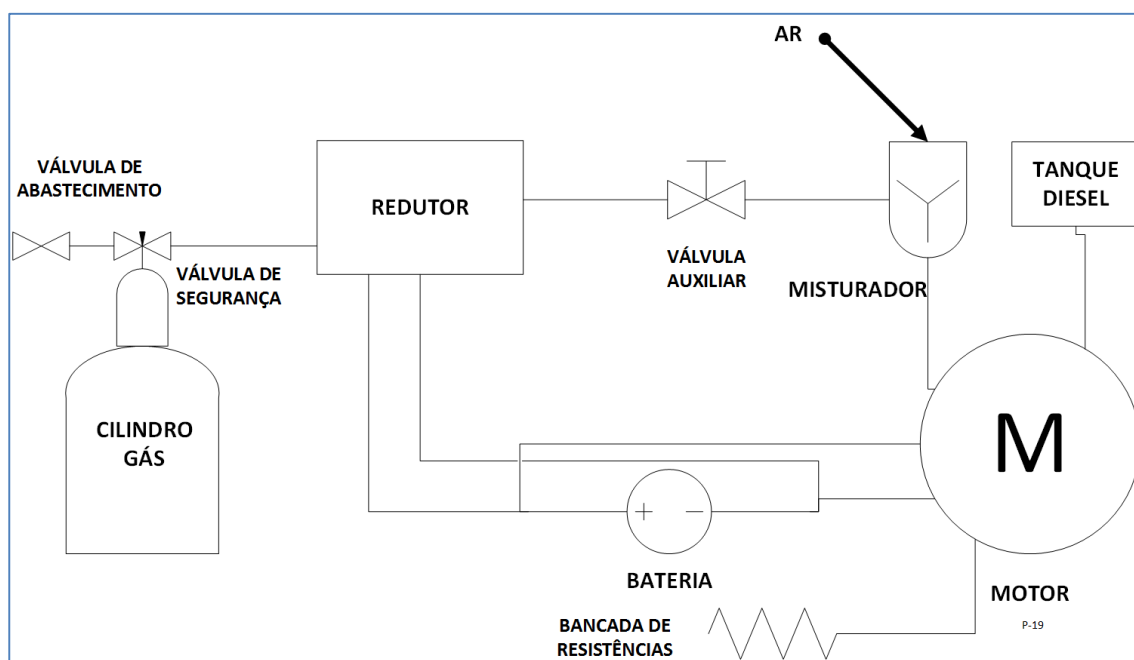


Figura 30 – Fluxograma de montagem da tecnologia DUAL FUEL montado no Laboratório LEA-FT-UnB.

Para as cargas de 2 kW, 4 kW, 6 kW, 8 kW e 10 kW foram coletadas amostras dos gases de exaustão em porta amostras no Laboratório LEA-FT-UnB. Esses gases junto com o GN, diesel puro, biodiesel e diesel comercial foram levados para Laboratório da Energia da FGA-UnB para análise no equipamento FTIR. Para análises das amostras líquidas tais como: B0, B5 e B100 foi utilizada o acessório de ATR utilizando cela ZnSe (Seleneto Zinco), já para analisar os gases do exaustor e amostra do GNV foi construída uma cela para detecção destes gases utilizando janelas de KBr (Brometo de Potássio), observadas na figura 31.

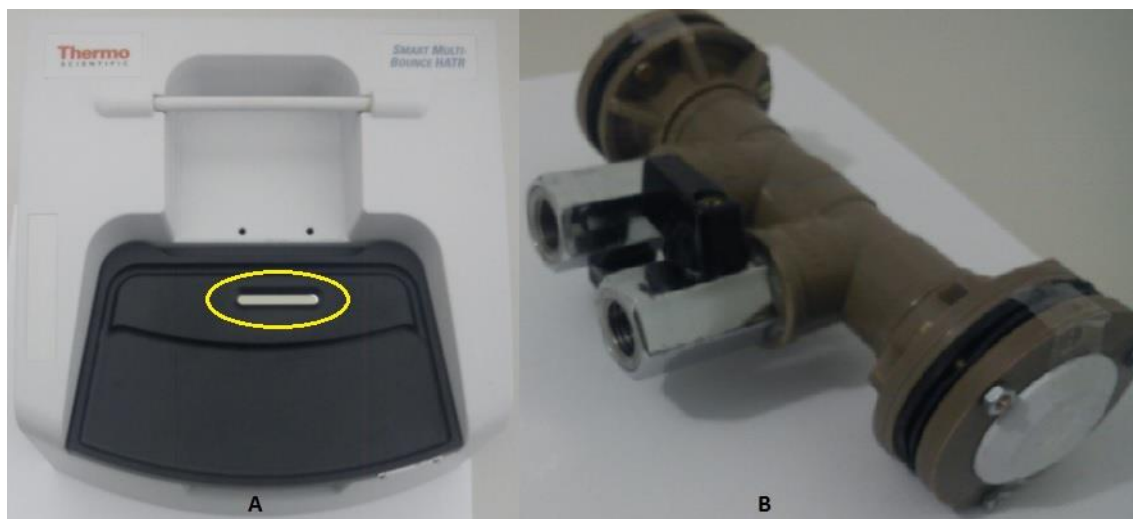


Figura 31 – Celas de: A) ZnSe e B) KBr.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os combustíveis utilizados foram o diesel comercial e o gás natural veicular. O diesel comercial, ou B5, possui em sua composição 5% de biodiesel. A figura 32 mostra os espectros do Diesel puro (B0), do biodiesel (B100) e do diesel comercial (B5).

O B0 apresentou picos nos números de onda 3008,01; 2955,03; 2852,99; 2801,96; 1376,50; 1465,58; 722,83 cm^{-1} que são característicos dos hidrocarbonetos.

O B100, além dos picos característicos de hidrocarbonetos, com intensidade menor se comparado ao do B0, teve também picos em 1736,39 cm^{-1} , número de onda que representa os ésteres (C=O) e em 1241,86; 1165,33; 1009,32 cm^{-1} que são característicos dos éteres (C-O-C).

O B5 possui tanto picos que representam os hidrocarbonetos, semelhante ao do diesel, e também dos grupos ésteres e éteres, só que com menor amplitude por ter apenas 5% do B100 em sua composição.

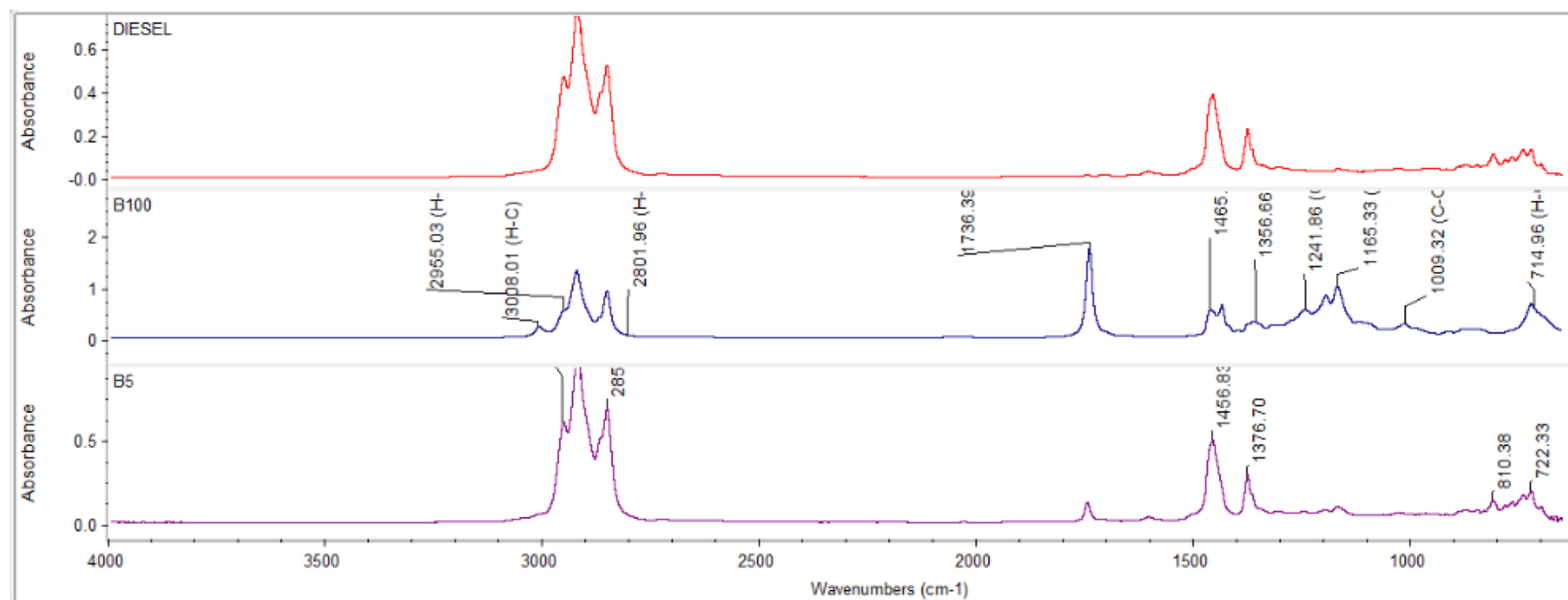


Figura 32 – Espectro do diesel puro, biodiesel e do diesel comercial.

Já o GNV, composto principalmente pelo metano, comercializado na região do DF apresentou o espectrograma da figura 3. Os picos em 3069,83; 2955,03; 2819,62 cm^{-1} são característicos da ligação H-C por estiramento correspondente ao metano (CH_4); em 1474,41; 11356,66; 829,76 cm^{-1} representam o grupo dos hidrocarbonetos caracterizados por deformação; em 1294,85; 1259,53; 1244,81 cm^{-1} são de monóxido de carbono (C-O); em 1539,17 representa o grupo N_2 .

Além disto, o espectro da figura 33 também apresenta a presença dos gases N_2 e CO. Segundo a ANP, vide tabela 4, esses grupos inertes representam no máximo 6% no GN. A concentração de metano mínima na região do centro-oeste é de 85%.

No experimento do motor funcionando com Diesel Comercial, obteve-se os dados de emissões de CO, de CO_2 e de hidrocarbonetos (HC) utilizando o analisador de gases PC – Multigás e também o consumo de diesel do motor na variação da balança. Os dados obtidos estão na tabela 10:

Tabela 10 – Emissões e consumo no motor a Diesel

| Diesel | Consumo de Diesel (g/s) | CO (%) | CO_2 (%) | HC (ppm) |
|--------|-------------------------|--------|-------------------|----------|
| 0 kW | 0,273 | 0,08 | 6 | 38 |
| 2 kW | 0,479 | 0,13 | 7,3 | 51 |
| 4 kW | 0,510 | 0,17 | 7,7 | 59 |
| 6 kW | 0,658 | 0,23 | 8,3 | 62 |
| 8 kW | 0,901 | 0,33 | 8,4 | 60 |
| 10 kW | 0,974 | 0,38 | 8,5 | 55 |

Já os resultados do teste com o motor funcionando com a mistura diesel e gás é mostrado na tabela 11, onde os dados em vermelho estão fora do padrão esperado:

Tabela 11 – Emissões e consumo no motor Dual Fuel.

| Dual Fuel | Consumo de Diesel (g/s) | CO (%) | CO_2 (%) | HC (ppm) |
|-----------|-------------------------|--------|-------------------|----------|
| 0 kW | - | 0,13 | 6,8 | 650 |
| 2 kW | 0,224 | 4,68 | 6,9 | 1012 |
| 4 kW | 0,215 | 1,74 | 2,17 | 784 |
| 6 kW | 0,465 | 6,45 | 7 | 631 |
| 8 kW | 0,55 | 1,95 | 6,8 | 414 |
| 10 kW | 0,499 | 2,53 | 3,8 | 295 |

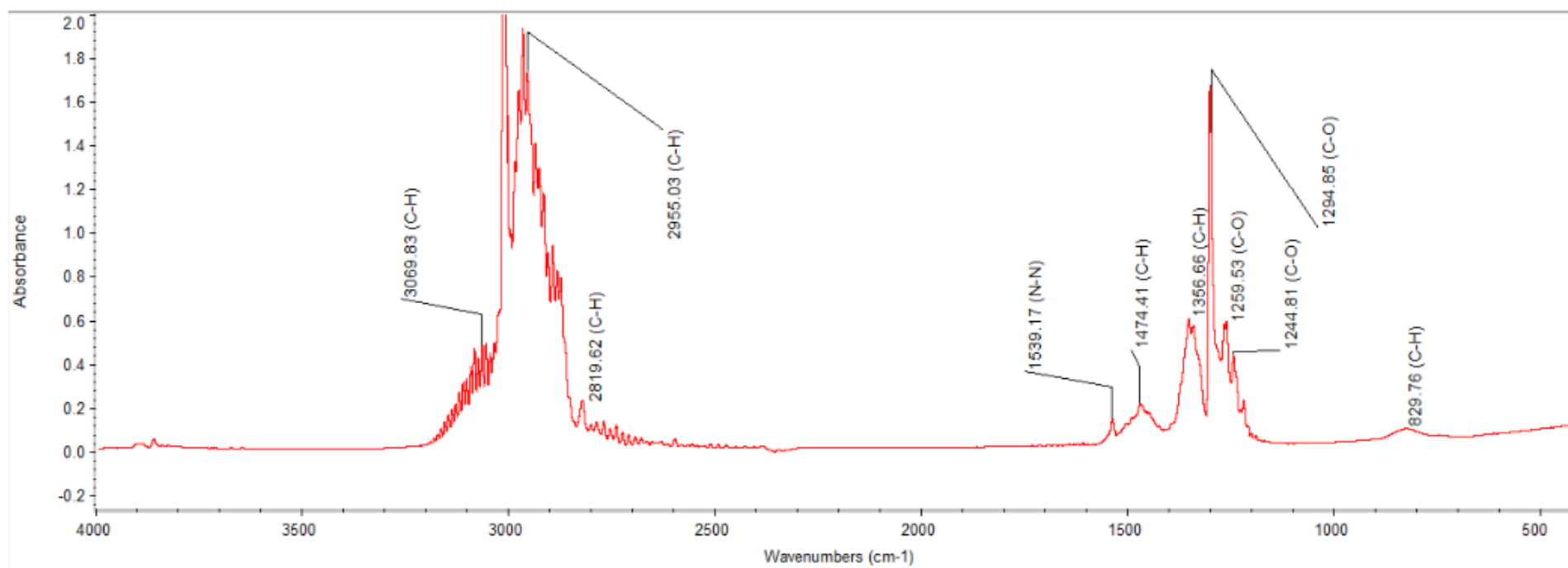


Figura 33 – Espectro do Gás Natural Veicular.

Como afirma Egúsquiza, 2009, as emissões de hidrocarbonetos (HC) e de monóxido de carbono (CO) aumentam, principalmente em cargas mais baixas devido a combustão incompleta do combustível, como visto nas tabelas 10 e 11. Segundo Lora, 2004, os motores diesel liberam com os gases de exaustão para a atmosfera entre 6,7 e 19 g/kWh de NO_x. Egúsquiza, 2009, afirmou que essa quantidade é reduzida quando o motor funciona em conjunto com o gás natural.

Comparando o consumo de diesel do motor gás-diesel com o motor diesel percebe-se uma redução significativa do consumo de diesel no motor utilizando os dois combustíveis.

Tabela 12 – Redução do consumo de diesel no motor Dual Fuel

| Carga (kW) | Redução (%) |
|------------|-------------|
| 2 | 53,279 |
| 4 | 57,865 |
| 6 | 29,323 |
| 8 | 38,923 |
| 10 | 48,767 |

As emissões de CO tiveram um aumento com o aumento de carga, vide figura 34. No entanto, as concentrações nas cargas de 2 e de 6 kW apresentam dois valores irregulares que provavelmente sejam originados por erros instrumentais pela interferência do particulado na hora da medição. A formação de monóxido de carbono ocorreu devido a combustão incompleta. A relação estequiométrica do motor é de 14:1 (ar:diesel), a adição de gás na admissão do ar levou a uma relação pobre, o que acarretou a combustão incompleta. Uma possível solução seria rever o misturador e balancear a relação gás:ar:diesel.

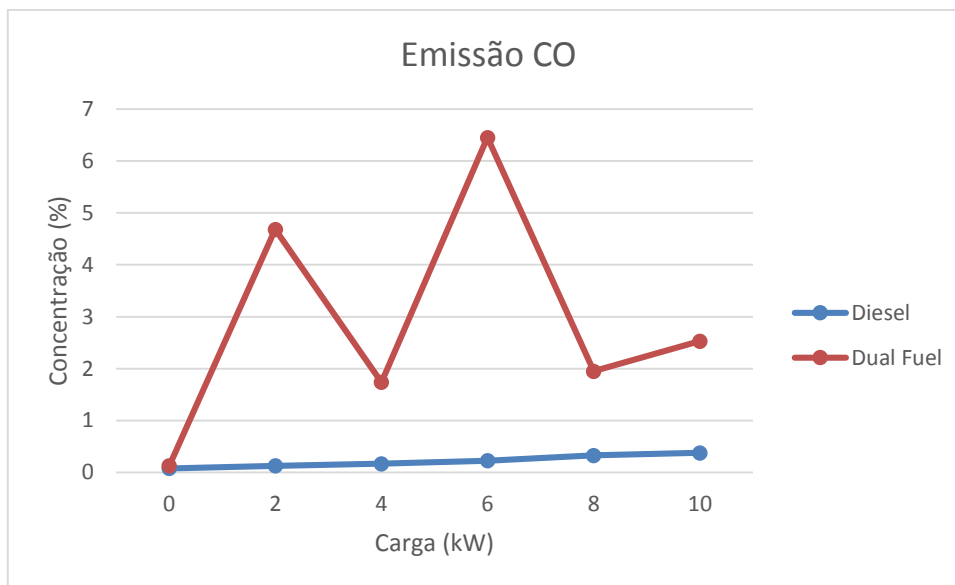


Figura 34 – Emissões de CO.

Já as emissões de CO₂ tiveram uma redução em praticamente todas as cargas como pode ser visualizado na figura 35. Em baixa carga a emissão ainda é maior, mas em altos regimes ocorre uma redução significativa dessas emissões. A concentração na cargas de 4 kW provavelmente foi um erro instrumental.

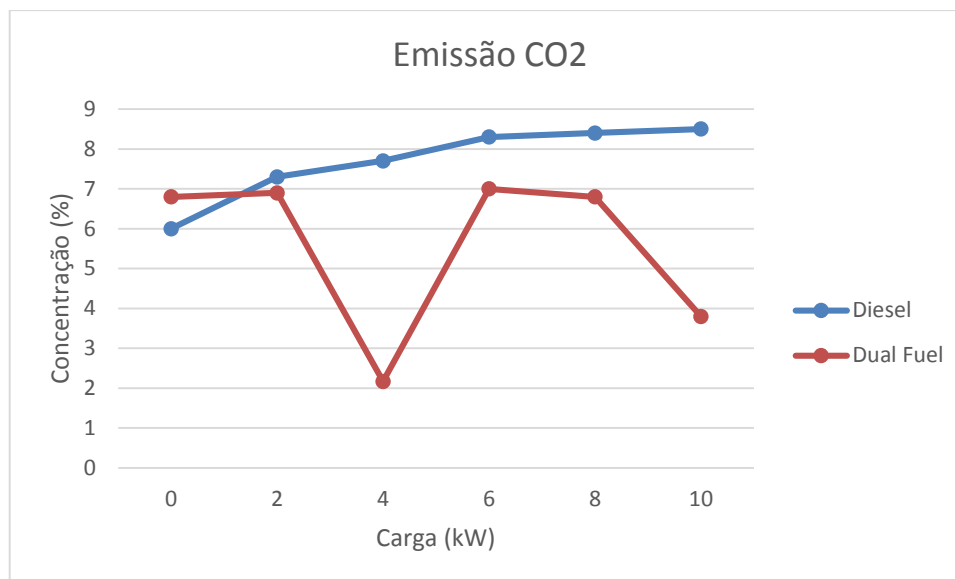


Figura 35 – Emissão de CO₂.

No entanto, as emissões de hidrocarbonetos se mostraram maior que as de diesel devido a ao gás ser composto de praticamente metano, figura 36. A maior emissão de hidrocarbonetos ocorre em 2 kW, mas é reduzida ao aumentar a carga. A maior emissão do motor funcionando com diesel foi em 6 kW.

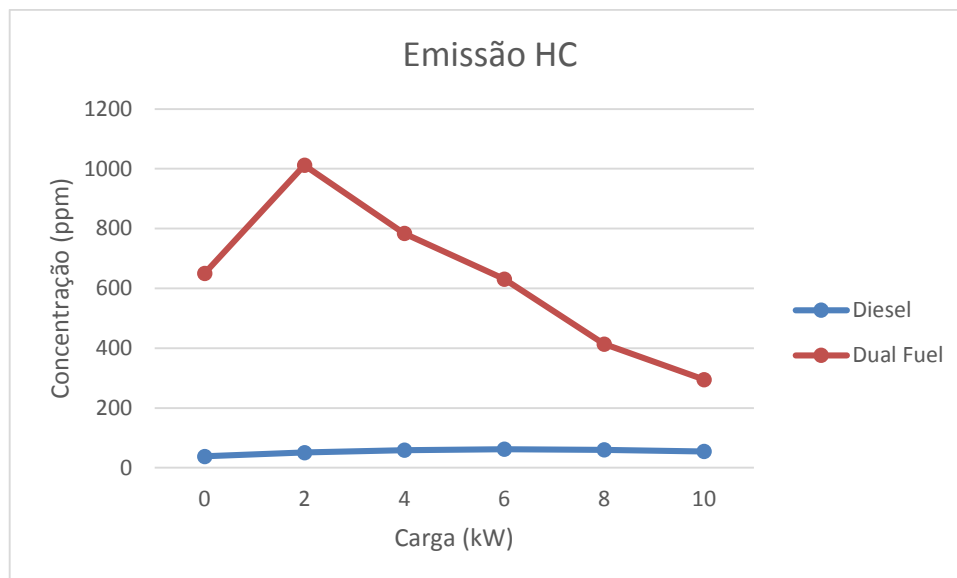


Figura 36 – Emissão de HC

O consumo de diesel foi reduzido com a adição do gás natural no motor. A figura 37 comprova que o consumo aumenta com o crescimento da carga em quase todos os pontos.

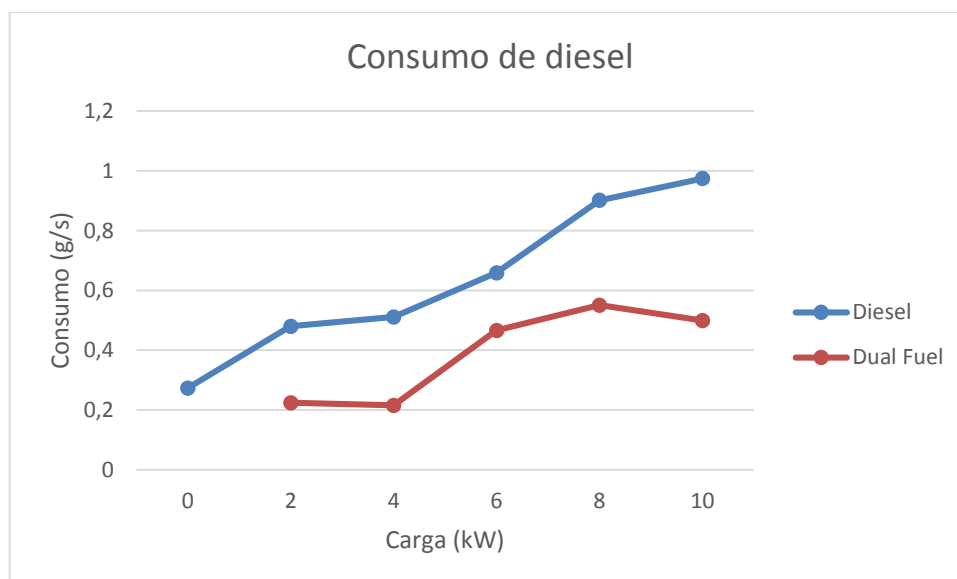


Figura 37 – Consumo Diesel.

A redução do consumo entre o motor funcionando inteiramente a diesel e a diesel mais GNV foi de aproximadamente 45%, como pode ser visualizado na figura 38. A maior redução, de 57% do consumo, ocorreu sobre a carga de 4 kW. Com o preço atual do Diesel, de 2,42 R\$/l no DF há uma economia aproximada de 1,10 R\$/litro.

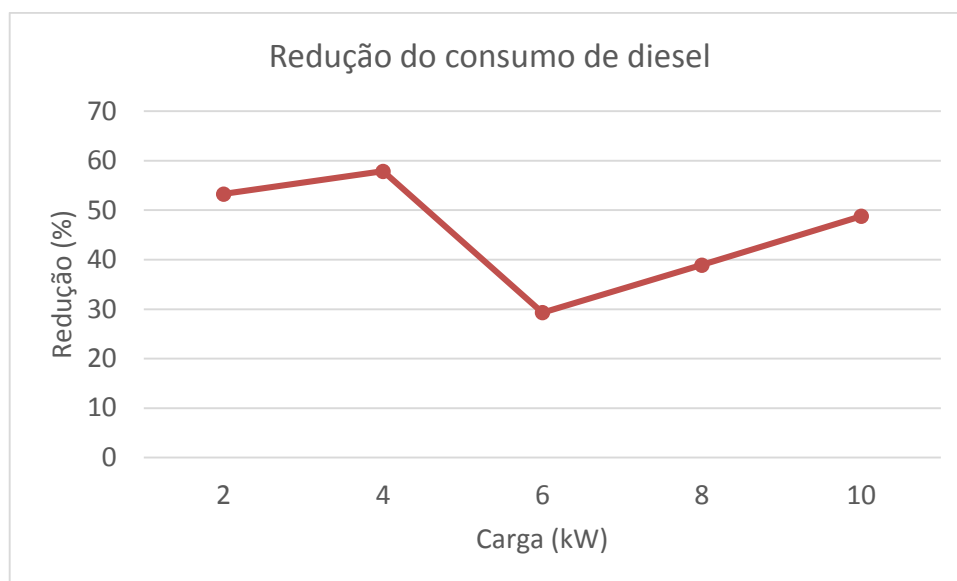


Figura 38 – Redução do consumo de diesel.

Os espectros dos gases de exaustão do motor funcionando com diesel e gás natural nas cargas 2, 4, 6, 8 e 10 kW são mostrados na figura 39.

Os picos em $3016,45$ e $2958,02\text{ cm}^{-1}$ são característicos da ligação H-C por estiramento correspondente ao metano (CH_4); observou-se também em 3700 ; $1253,73\text{ cm}^{-1}$ picos característicos do vapor da água; em $1360,54$; $1304,62$; $729,82$; $668,77\text{ cm}^{-1}$ representam hidrocarbonetos por deformação; já na região de 2345 cm^{-1} foi detectado o pico característico do CO_2 ; em $2266,22\text{ cm}^{-1}$ a presença de NO_x ; em $2170,28$; $2119,37\text{ cm}^{-1}$ representam CO. O pico mais característico é o de CO_2 devido sua concentração ser maior, como verificado na tabela 11.

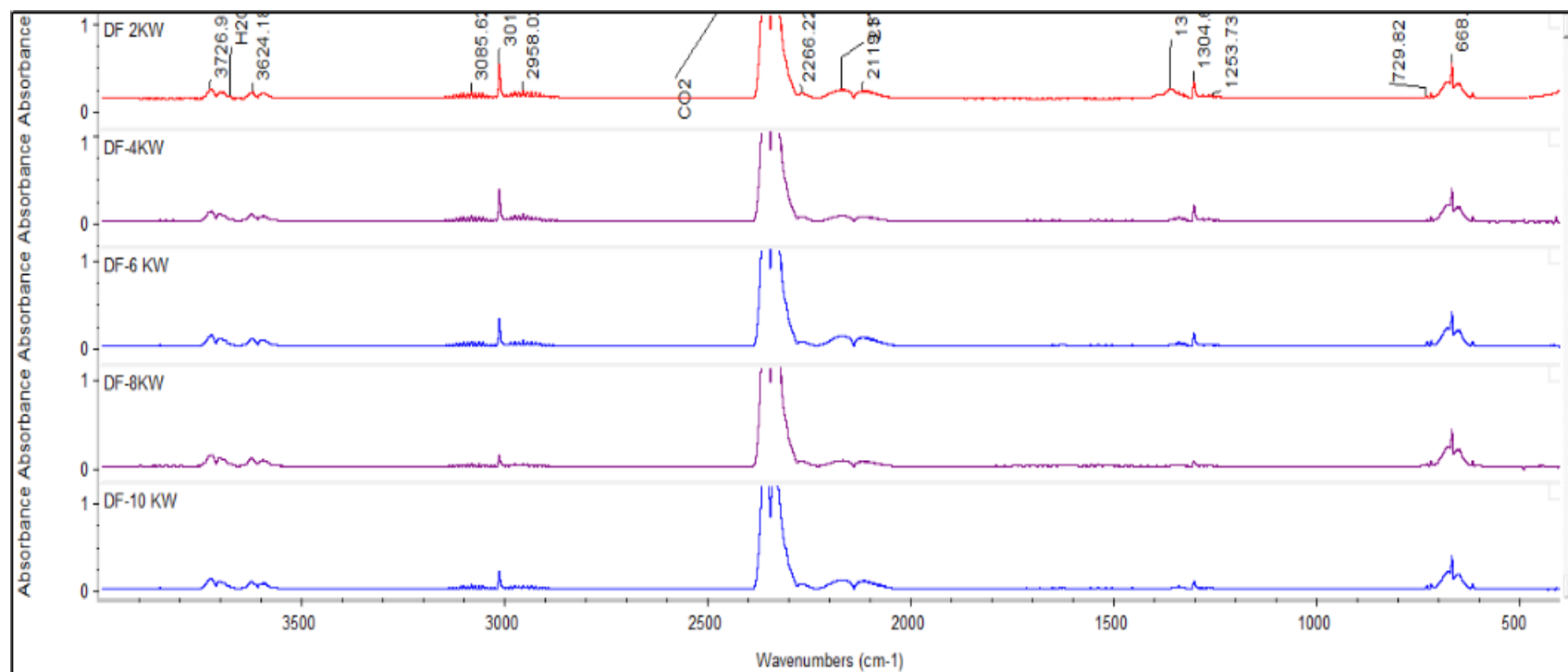


Figura 39 – Infravermelho dos gases de Exaustão.

6. CONCLUSÕES

6.1 CONCLUSÕES FINAIS

Os testes de motor dual fuel comprovaram que há uma redução na emissão de dióxido de carbono comparada com as emissões de um motor de ignição por compressão tradicional, assim como a redução de particulados (Anexo VI) e de óxidos de nitrogênio como visto nos picos inexpressíveis no espectro dos gases de exaustão, figura 33. No entanto, houve aumento nas emissões de hidrocarbonetos e de monóxido de carbono.

O consumo de diesel também se reduziu por praticamente metade, 45%, nos testes, isso representa uma economia de 1,10 R\$/litro de diesel. A sua utilização em veículos com ignição por compressão ocasiona primeiramente uma redução na emissão de particulados, enxofre, de óxido de nitrogênio e de dióxido de carbono. Posteriormente percebe-se uma influência na preservação do motor, pelo fato de melhorar a lubrificação e reduzir a formação de depósitos.

Conclui-se que o gás natural é uma rota viável para comercialização no DF tanto na redução de poluentes quanto na dependência do petróleo, apesar da presença de metano na sua composição, o qual induz ao aumento de emissões de hidrocarbonetos.

6.2 PRÓXIMOS TRABALHOS

Apesar deste trabalho suprir a necessidade de informar sobre a viabilidade técnico da comercialização do gás na região do DF tanto com a redução de emissões quanto com a redução de consumo do Diesel, algumas atividades poderão ser realizadas em trabalhos futuros para confirmar as afirmações deste projeto e enriquecer os dados de viabilidade do gás. Os pontos que devem ser frisados são:

- Inserir Cella que determina NO_x no analisador de gases;
- Determinar a relação de operação ideal gás:ar:diesel;
- Determinar o consumo do Gás Natural no motor Dual Fuel;
- Rever o misturador para evitar a combustão pobre que ocasionou a formação de CO;
- Analisar o Gás Natural por Cromatografia para verificar os elementos presentes em sua composição;
- Realizar o teste do motor com acréscimo e decréscimo de carga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, *Gás Natural Classificação de Gasodutos, A Lei do Gás e Planejamento de Expansão da Malha de Transporte*, 2011.

ALMEIDA, G. S., *Metodologia para Avaliação Econômica de Unidades Resfriadoras de Líquidos por Ciclos de Compressão e Absorção*, Dissertação de mestrado, UNB, 2006.

BARBOZA, L. C. A., *Espectroscopia no Infravermelho na Caracterização de Compostos Orgânicos*, Editora UFV, Minas Gerais, 2007.

BET, Luciano. *Avaliação do Comportamento de um motor diesel refrigerado a ar, funcionando como motor dual Diesel-GNC*. Dissertação Mestrado, UFRN, 1991.

BRITISH PETROLEUM STATICAL – BP Statical, *Natural Gas Production*, 2012.

BRASIL, N. I., ARAUJO, M. A. S., SOUSA, E. C. M., *Processamento de Petróleo e Gás*, Editora LTC, Rio de Janeiro, 2011.

CEBGAS, *O Gás Natural: Origem e Logística*, 2012.

CONCEIÇÃO, G. W., *A Viabilidade Técnico, Econômica e Ambiental da inserção de Gás Natural em Frotas do Transporte Coletivo Urbano de Passageiros*, Dissertação de Pós Graduação, UFRJ, 2006.

CONTATOS PESSOAIS 1: Aulas de Petróleo e Gás ministradas pela professora Doutora Maria del Pilar Hidalgo Falla no ano de 2012.

CONTATOS PESSOAIS 2: Palestra sobre a empresa CEBGÁS ministrado pelo engenheiro Heden Cruz no ano de 2012.

EGÚSQUIZA, J.C., BRAGA, S.L., *Performace and Gaseous emissions Characteristics of a natural gas/diesel dual fuel turbocharged and aftercooled engine*, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engeneering, 2009.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, *Balanço Energético Nacional: Relatório Final 2011*, 2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, *Gás Natural: Metodologia de Elaboração das projeções de gás natural*, A Lei do Gás e Planejamento de Expansão da Malha de Transporte, 2011.

FAHIM, M. A., AL-SAHHAF, T. A., ELKILANI A. S., *Introdução ao Refino de Petróleo*, Editora Elseiver, Rio de Janeiro, 2012.

FRANCO, A. C. L., *Análise Técnico-Econômica da Substituição Parcial do Combustível Diesel pelo Gás Natural em Motores Marítimos na Região da Amazônica*, Dissertação de pós graduação, UFP, 2007.

GELLER, H. S., *Revolução Energética: Políticas para um futuro sustentável*, Editora Relume Dumará, Rio de Janeiro, 2003.

GOMES, J. S., ALVES, F. B., *O Universo da Indústria Petrolífera: da pesquisa à refinação*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2007.

HINRICH, R. A., KLEINBACH, M., *Energia e Meio Ambiente*, Editora cengage Learning, Brasil, 2004.

JUNIOR, H. Q. P., *Economia da Energia: Fundamentos Econômicos, Evolução Histórica e Organização Industrial*, Editora Elsevier, Rio de Janeiro, 2007.

KAWANO, Y., *Espectroscopia Vibracional de absorção no infravermelho*, IQ – USP. São Paulo, SP, 2002.

LASTRES, L. F. M., *Desenvolvimento de Sistema Eletrônico de Conversão de Motores Mercedes Benz OM 366 para uso de Gás Natural*, Petrobras/CENPES, 1991.

LORA, E. E. NASCIMENTO, M. A. R., *Geração Termelétrica: Planejamento, Projeto e Operação*, Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2004.

LUZ, E. R., *Predição de Propriedades de Gasolinas Usando Espectroscopia e Regressão por Mínimos Quadrados Parciais*, Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, 2003.

ORLANDO, A.F., NEWSON, J., *Construção de Motores Diesel para operação com combustível Dual Diesel Gás Natural: Avaliação e desempenho de Ônibus Urbanos*, 7th Brazilian Congress of Engineering and Thermal Sciences – ENCIT, Rio de Janeiro, 1998.

PETROBRAS, *Energia e Tecnologia: Gás Natural*, 2012.

PINTO, M. C., *A Formação da Indústria Global do Gás Natural*, Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2010.

ROUZAT, N. B., FAVENNEC, J. P., *Petróleo & Gás Natural: Como produzir e a que custo*, 2ª edição, editora Synergia, Paris, 2007.

SCHIMITZ, C., *Uma pitada de Pré-Sal*, Revista: O Empreendedor, fevereiro de 2010.

SILVERSTEIN, R. M., BASSLER, G. C., MORRIL, T. C., *Identificação espectrométrica de compostos orgânicos*, 5ª ed., Editora LTC, Rio de Janeiro, 1994.

SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R., *Fundamentos de Química Analítica*, Editora Pioneira, São Paulo, 2006.

THOMAS, J. E., *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*, Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2001.

VOGEL, MENDHAM, J., DENNEY, R. C., *Análise Química e Quantitativa*, Editora LTC, Rio de Janeiro, 2002.

ANEXOS

| | |
|-----------|---|
| Anexo I | Região destinada à CEBGAS |
| Anexo II | Reservatórios de Gás |
| Anexo III | Carretas Criogênicas |
| Anexo IV | Visita a White Martins Praxair INC |
| Anexo V | Políticas de redução de emissões de gases |
| Anexo VI | A) Sacola com particulado B) Vista ampliada |



Anexo I – Região destinada à CEBGÁS



Anexo II – Reservatórios de Gás;



Anexo III – Carretas Criogênicas;



Anexo IV – Visita a White Martins Praxair INC;

| g/ kwh | | 1992 | 1996 | 1998 | 2000 | 2006 | | 2008 |
|----------|------------|---------|----------|------|----------|------------|-----------|-----------|
| | | Euro I | Euro II | | Euro III | Euro IV | | Euro V |
| EUROPA | CO | 4,5 | 4 | - | 2,1 | 1,5 | | 1,5 |
| | HC | 1,1 | 1,1 | - | 0,66 | 0,46 | | 0,46 |
| | NOx | 8 | 7 | - | 5 | 3,5 | | 2 |
| | Part. | 0,36 | 0,25 | 0,15 | 0,1 | 0,02 | | 0,02 |
| PROCONVE | | 1994 | 1996 | 1998 | 2000 | 2006 | 2009 | |
| | | Fase II | Fase III | | Fase IV | P-5 (ESC) | P-6 (ESC) | P-6 (ETC) |
| BRASIL | CO | 11,2 | 4,9 | | 4 | 2,1 | 1,5 | 4 |
| | HC Totais | 2,45 | 1,23 | | 1,1 | 0,66 | 0,46 | 1,1 |
| | HC NMHC | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 0,55 |
| | NOx | 14,4 | 9 | | 7 | 5 | 3,5 | 3,5 |
| | Part. | --- | 0,4/ 0,7 | | 0,15 | 0,1 / 0,13 | 0,02 | 0,03 |
| | Opac (ELR) | --- | --- | --- | --- | 0,8 (ELR) | 0,5 (ELR) | |

Anexo V – Políticas de Redução de Emissões de Gases.



Anexo VI – A) Sacola com particulado B) Vista ampliada